# Física

## CONCEPTUAL

**Decimosegunda edición**

Paul G. Hewitt

Pearson

# Física
## CONCEPTUAL

# Física
## CONCEPTUAL
### Decimosegunda edición

*escrito e ilustrado por*

**Paul G. Hewitt**

*City College of San Francisco*

*TRADUCCIÓN*

**Víctor Campos Olguín**

*Traductor profesional*

*REVISIÓN TÉCNICA*

**Guillermo Alberto Govea Anaya**

*Universidad Nacional Autónoma de México*

**Sandra Lilia Castillo Flores**

*Instituto Tecnológico de Estudios Superiores Campus Aguascalientes*

**Elías Loyola Campos**

*Universidad Panamericana Campus Bonaterra*



Pearson

Datos de catalogación

Autor: Paul G. Hewitt
*Física conceptual*
*12ª edición*

Pearson Educación de México, S.A. de C.V., México, 2016
ISBN: 978-607-32-3822-9

Área: Bachillerato / Ciencias

Formato: 21 x 27 cm Páginas: 816

Traducción autorizada de la edición en idioma inglés, titulada CONCEPTUAL PHYSICS, por PAUL G. HEWITT, publicada por Pearson Education, Inc., y otras afiliaciones. Copyright © 2015. Todos los derechos reservados.

Authorized translation from the U. S. English language edition, entitled CONCEPTUAL PHYSICS, by PAUL G. HEWITT, Copyright © 2015. Published by Pearson Education Inc., or its affiliates. Used by permission. All Rights Reserved.

ISBN 13: 978-0-321-90910-7

Esta edición en español es la única autorizada para ser publicada por Pearson Educación de México S.A. de C.V. Copyright © 2016. Pearson Education, Inc., y otras afiliaciones.

**Edición en inglés**

• **Publisher:** Jim Smith • **Project Manager:** Chandrika Madhavan • **Assistant Editor:** Kyle Doctor • **Marketing Manager:** Will Smith • **Program Manager:** Mary O'Connell • **Senior Content Producer:** Kate Brayton • **Production Service and Composition:** Cenveo® Publisher Services • **Project Manager, Production Service:** Cindy Johnson • **Copyeditor:** Carol Reitz • **Design Manager:** Derek Bacchus • **Text Design:** Tamara Newnam • **Cover Designer:** Tamara Newnam • **Illustrations:** Rolin Graphics, Inc. • **Photo Researcher:** Stephen Merland, PreMediaGlobal • **Image Lead:** Maya Melenchuk • **Manufacturing Buyer:** Jeffrey Sargent • **Printer and Binder:** Courier/Kendallville • **Cover Printer:** Lehigh/Phoenix • **Cover Photo Credit:** Top Seller/Shutterstock

## FÍSICA CONCEPTUAL

**Decimosegunda edición en español**

• **Director general:** Sergio Fonseca • **Director de innovación y servicios educativos:** Alan David Palau • **Gerente de contenidos y servicios editoriales:** Jorge Luis Íñiguez • **Gerente de arte y diseño:** Asbel Ramírez • **Coordinadora de contenidos de bachillerato y custom:** Lilia Moreno • **Especialista de contenidos de aprendizaje:** Berenice Torruco • **Coordinadora de arte y diseño:** Mónica Galván • **Supervisor de arte y diseño:** Timoteo Eliosa • **Supervisora de desarrollo:** Olga Sánchez • **Correctora de estilo:** Elia Olvera • **Composición y diagramación:** Carácter tipográfico • **Lectores de pruebas:** Javier García, Nelly Godoy, Teresa Parra

**Contacto:** soporte@pearson.com

DECIMOSEGUNDA EDICIÓN, 2016
D.R. © 2016 por Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
Avenida Antonio Dovalí Jaime Núm. 70
Torre B, Piso 6, Colonia Zedec Ed. Plaza Santa Fe,
Delegación Álvaro Obregón, Ciudad de México, CP 01210.

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana Reg. Núm. 1031

ISBN LIBRO IMPRESO: 978-607-32-3822-9

ISBN E-BOOK: 978-607-32-3818-2

PEARSON

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito del editor.

*Para mis nietos, Manuel, Marie, Kara, Alexander, Megan, Grace, y Emily*
*y para todos los estudiantes que luchan por aprender física.*

# Contenido breve


Para el estudiante xvi

Para el instructor xvii

1 Acerca de la ciencia 2

PARTE UNO
Mecánica 19

2 Primera ley de Newton de movimiento: inercia 20
3 Movimiento lineal 39
4 Segunda ley de Newton de movimiento 57
5 Tercera ley de Newton de movimiento 74
6 Cantidad de movimiento 90
7 Energía 109
8 Movimiento rotacional 132
9 Gravedad 160
10 Movimiento de proyectiles y satélites 182

PARTE DOS
Propiedades de la materia 207

11 La naturaleza atómica de la materia 208
12 Sólidos 226
13 Líquidos 244
14 Gases 264

PARTE TRES
Calor 283

15 Temperatura, calor y expansión 284
16 Transferencia de calor 302
17 Cambio de fase 320
18 Termodinámica 336

PARTE CUATRO
Sonido 355

19 Vibraciones y ondas 356
20 Sonido 374
21 Sonidos musicales 391

PARTE CINCO
Electricidad y magnetismo 405

22 Electrostática 406
23 Corriente eléctrica 430
24 Magnetismo 452
25 Inducción electromagnética 469

PARTE SEIS
Luz 485

26 Propiedades de la luz 486
27 Color 504
28 Reflexión y refracción 519
29 Ondas de luz 544
30 Emisión de luz 562
31 Cuantos de luz 582

PARTE SIETE
Físicas atómica y nuclear 601

32 El átomo y el cuanto 602
33 El núcleo atómico y la radiactividad 615
34 Fisión y fusión nucleares 637

PARTE OCHO
Relatividad 657

35 Teoría de la relatividad especial 658
36 Teoría de la relatividad general 686

APÉNDICE A Sobre la medición y la conversión de unidades 703
APÉNDICE B Más sobre el movimiento 709
APÉNDICE C Elaboración de gráficas 713
APÉNDICE D Aplicaciones de los vectores 716
APÉNDICE E Crecimiento exponencial y tiempo de duplicación 719

RESPUESTAS A PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR S-1
GLOSARIO G-1
CRÉDITOS C-1
ÍNDICE I-1

# Contenido


Álbum fotográfico de *Física conceptual* xiv
Para el estudiante xvi
Para el instructor xvii
Agradecimientos xxi

**1 Acerca de la ciencia 2**

1.1 Mediciones científicas 3
*Cómo Eratóstenes midió el tamaño de la Tierra* 3
*Tamaño de la Luna* 4
*Distancia a la Luna* 5
*Distancia al Sol* 6
*Tamaño del Sol* 7
*Matemáticas: el lenguaje de la ciencia* 8
1.2 Métodos científicos 8
*La actitud científica* 8
1.3 Ciencia, arte y religión 12
■ PSEUDOCIENCIA 13
1.4 Ciencia y tecnología 14
■ VALORACIÓN DEL RIESGO 14
1.5 Física: la ciencia básica 15
1.6 En perspectiva 16

**PARTE UNO**
**Mecánica 19**

**2 Primera ley de Newton de movimiento: inercia 20**

2.1 Aristóteles en movimiento 21
*Copérnico y la Tierra en movimiento* 22
■ ARISTÓTELES (384-322 A. C.) 23
2.2 Los experimentos de Galileo 23
*La torre inclinada* 23
*Planos inclinados* 23
■ GALILEO GALILEI (1564-1642) 24
2.3 Primera ley de Newton de movimiento 26
■ ENSAYO PERSONAL 27
2.4 Fuerza neta y vectores 28
*Vectores de fuerza* 29
2.5 La regla del equilibrio 30
■ PRACTICANDO LA FÍSICA 31
2.6 Fuerza de sostén 32
2.7 Equilibrio de cosas en movimiento 32
2.8 La Tierra en movimiento 33

**3 Movimiento lineal 39**

3.1 El movimiento es relativo 40
3.2 Rapidez 41
*Rapidez instantánea* 41
*Rapidez promedio* 41
3.3 Velocidad 42
*Velocidad constante* 43
*Velocidad variable* 43
3.4 Aceleración 43
*Aceleración sobre los planos inclinados de Galileo* 45
3.5 Caída libre 46
*Qué tan rápido* 46
*Qué tan lejos* 48
■ TIEMPO "DE VUELO" 50
*Qué tan rápido cambia el "qué tan rápido"* 50
3.6 Vectores de velocidad 51

**4 Segunda ley de Newton de movimiento 57**

4.1 La fuerza causa aceleración 58
4.2 Fricción 59
4.3 Masa y peso 61
*La masa resiste la aceleración* 63
4.4 Segunda ley de Newton de movimiento 63
4.5 Cuando la aceleración es *g*: caída libre 64
4.6 Cuando la aceleración es menor que *g*: caída no libre 65

**5 Tercera ley de Newton de movimiento 74**

5.1 Fuerzas e interacciones 75
5.2 Tercera ley de Newton de movimiento 76
*Define tu sistema* 77

5.3 Acción y reacción sobre masas diferentes 79
■ PRACTICANDO LA FÍSICA: GUERRA DE JALAR LA SOGA 81
5.4 Vectores y la tercera ley 82
5.5 Resumen de las tres leyes de Newton 85

6 Cantidad de movimiento 90
6.1 Cantidad de movimiento 91
6.2 Impulso 92
6.3 El impulso cambia la cantidad de movimiento 93
*Caso 1: Aumento de la cantidad de movimiento* 93
*Caso 2: Disminución de la cantidad de movimiento durante un tiempo prolongado* 94
*Caso 3: Disminución de la cantidad de movimiento durante un tiempo breve* 94
6.4 Rebote 96
6.5 Conservación de la cantidad de movimiento 97
■ LEYES DE CONSERVACIÓN 98
6.6 Colisiones 99
6.7 Colisiones más complicadas 102

7 Energía 109
7.1 Trabajo 110
*Potencia* 112
*Energía mecánica* 113
7.2 Energía potencial 113
7.3 Energía cinética 114
7.4 Teorema trabajo-energía 115
7.5 Conservación de la energía 117
■ ENERGÍA Y TECNOLOGÍA 118
■ FÍSICA EN EL CIRCO 119
*Energía reciclada* 119
7.6 Máquinas 120
7.7 Eficiencia 121
7.8 Fuentes de energía 123
■ CIENCIA BASURA 125

8 Movimiento rotacional 132
8.1 Movimiento circular 133
■ RUEDAS EN LOS FERROCARRILES 135
8.2 Inercia rotacional 136
8.3 Momento de torsión 139
8.4 Centro de masa y centro de gravedad 140
*Ubicación del centro de gravedad* 142
*Estabilidad* 143
8.5 Fuerza centrípeta 145
■ PRACTICANDO LA FÍSICA: BALANCEO DE CUBETA CON AGUA 146
8.6 Fuerza centrífuga 147
*Fuerza centrífuga en un marco de referencia en rotación* 147
*Gravedad simulada* 148
8.7 Cantidad de movimiento angular 150
8.8 Conservación de la cantidad de movimiento angular 151

9 Gravedad 160
9.1 La ley de gravitación universal 161
9.2 La constante de gravitación universal, *G* 163
9.3 Gravedad y distancia: la ley del inverso al cuadrado 164
9.4 Peso e ingravidez 166
9.5 Mareas oceánicas 167
*Mareas en la tierra y la atmósfera* 170
*Abultamientos de marea en la Luna* 170
9.6 Campos gravitacionales 170
*Campo gravitacional en el interior de un planeta* 171
*Teoría de gravitación de Einstein* 173
9.7 Agujeros negros 174
9.8 Gravitación universal 175

10 Movimiento de proyectiles y satélites 182
10.1 Movimiento de proyectiles 183
*Proyectiles lanzados horizontalmente* 184
*Proyectiles lanzados en un ángulo* 186
■ PRACTICANDO LA FÍSICA: CUENTAS COLGANTES PRÁCTICAS 187
■ NUEVA VISITA AL "TIEMPO DE VUELO" 190
10.2 Proyectiles con movimiento rápido: satélites 190
10.3 Órbitas satelitales circulares 192
10.4 Órbitas elípticas 194
■ MONITORIZACIÓN MUNDIAL VÍA SATÉLITE 195
10.5 Leyes de movimiento planetario de Kepler 196
■ CÓMO ENCONTRAR TU CAMINO 197
10.6 Conservación de energía y movimiento de satélites 197
10.7 Rapidez de escape 198

PARTE DOS

## Propiedades de la materia 207


### 11 La naturaleza atómica de la materia 208

11.1 La hipótesis atómica 209
■ LA CAÍDA DE ALICIA 210
11.2 Características de los átomos 210
11.3 Imágenes atómicas 212
11.4 Estructura atómica 213
*Los elementos* 214
11.5 La tabla periódica de los elementos 215
*Tamaños relativos de los átomos* 215
11.6 Isótopos 218
11.7 Compuestos y mezclas 219
11.8 Moléculas 220
11.9 Antimateria 221
*Materia oscura* 222

### 12 Sólidos 226

12.1 Estructura cristalina 227
■ EL PODER DE LOS CRISTALES 229
12.2 Densidad 229
12.3 Elasticidad 230
12.4 Tensión y compresión 232
■ PRACTICANDO LA FÍSICA: FUERZA DE LAS VARAS 233
12.5 Arcos 234
■ FABRICACIÓN ADITIVA O IMPRESIÓN 3-D 235
12.6 Escalamiento 236

### 13 Líquidos 244

13.1 Presión 245
13.2 Presión de un líquido 246
13.3 Flotabilidad 249
13.4 Principio de Arquímedes 250
13.5 ¿Qué hace que un objeto se hunda o flote? 251
13.6 Flotación 253
■ MONTAÑAS FLOTANTES 254
13.7 Principio de Pascal 255
13.8 Tensión superficial 257
13.9 Capilaridad 258

### 14 Gases 264

14.1 La atmósfera 265
14.2 Presión atmosférica 266
*El barómetro* 268
14.3 Ley de Boyle 270
14.4 Flotabilidad del aire 271
14.5 El principio de Bernoulli 272
*Aplicaciones del principio de Bernoulli* 274
■ PRACTICANDO LA FÍSICA 275
14.6 Plasma 276
*Plasma en el mundo cotidiano* 276
*Electricidad plasmática* 277


PARTE TRES

## Calor 283


### 15 Temperatura, calor y expansión 284

15.1 Temperatura 285
15.2 Calor 287
*Medición del calor* 289
15.3 Capacidad calorífica específica 289
15.4 La alta capacidad calorífica específica del agua 290
15.5 Expansión térmica 291
*Expansión del agua* 293
■ VIDA EN LOS EXTREMOS 295

### 16 Transferencia de calor 302

16.1 Conducción 303
16.2 Convección 304
■ PRACTICANDO LA FÍSICA 307
16.3 Radiación 307
*Emisión de energía radiante* 308
*Absorción de energía radiante* 309
*Reflexión de energía radiante* 310
*Enfriamiento en la noche mediante radiación* 310
16.4 Ley de Newton de enfriamiento 311
16.5 El efecto invernadero 312
16.6 Cambio climático 313
16.7 Energía solar 314
■ PRACTICANDO LA FÍSICA 315
16.8 Cómo controlar la transferencia de calor 315

## 17 Cambio de fase 320

17.1 Fases de la materia 321
17.2 Evaporación 321
17.3 Condensación 323
*Condensación en la atmósfera* 324
*La niebla y las nubes* 325
17.4 Ebullición 325
*Géiseres* 326
*La ebullición es un proceso de enfriamiento* 326
*Ebullición y congelación al mismo tiempo* 327
17.5 Fusión y congelación 327
*Rehielo* 328
17.6 Energía y cambios de fase 328
PRACTICANDO LA FÍSICA 332

## 18 Termodinámica 336

18.1 Termodinámica 337
18.2 El cero absoluto 337
*Energía interna* 339
18.3 La primera ley de la termodinámica 339
18.4 Procesos adiabáticos 341
18.5 La meteorología y la primera ley 341
18.6 La segunda ley de la termodinámica 344
*Máquinas térmicas* 344
¡ESCENIFICACIÓN DE LA TERMODINÁMICA! 346
18.7 La energía tiende a dispersarse 347
18.8 Entropía 349

PARTE CUATRO
# Sonido 355

## 19 Vibraciones y ondas 356

19.1 Buenas vibraciones 357
*Vibración de un péndulo* 358
19.2 Descripción de ondas 358
19.3 Movimiento ondulatorio 360
PRACTICANDO LA FÍSICA 361
*Ondas transversales* 361
*Ondas longitudinales* 361
19.4 Rapidez de ondas 362
19.5 Interferencia de ondas 363
*Ondas estacionarias* 364
19.6 Efecto Doppler 365
19.7 Ondas de proa 367
19.8 Ondas de choque 367

## 20 Sonido 374

20.1 La naturaleza del sonido 375
*Origen del sonido* 375
*Medios que transmiten el sonido* 376
20.2 El sonido en el aire 376
BOCINA 378
*Rapidez del sonido en el aire* 378
PRACTICANDO LA FÍSICA 379
*Energía en ondas sonoras* 379
20.3 Reflexión del sonido 379
20.4 Refracción del sonido 380
20.5 Vibraciones forzadas 382
*Frecuencia natural* 382
20.6 Resonancia 382
20.7 Interferencia 384
20.8 Batimientos 385
TRANSMISIONES DE RADIO 386

## 21 Sonidos musicales 391

21.1 Ruido y música 392
21.2 Altura 393
21.3 Intensidad del sonido y sonoridad 394
21.4 Calidad 395
21.5 Instrumentos musicales 396
21.6 Análisis de Fourier 397
21.7 De analógico a digital 399

PARTE CINCO
# Electricidad y magnetismo 405

## 22 Electrostática 406

22.1 Electricidad 407
*Fuerzas eléctricas* 408
22.2 Cargas eléctricas 408
22.3 Conservación de la carga 409
TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA Y CHISPAS 410
22.4 Ley de Coulomb 411
22.5 Conductores y aislantes 412
*Semiconductores* 412
*Superconductores* 413
22.6 Carga 413
*Carga mediante fricción y contacto* 413
*Carga por inducción* 414

22.7 Polarización de la carga 416
22.8 Campo eléctrico 417
■ HORNO DE MICROONDAS 418
*Blindaje eléctrico* 419
22.9 Potencial eléctrico 421
*Almacenamiento de energía eléctrica* 423
*Generador Van de Graaff* 424

**23 Corriente eléctrica 430**

23.1 Flujo de carga y corriente eléctrica 431
23.2 Fuentes de voltaje 432
23.3 Resistencia eléctrica 433
23.4 La ley de Ohm 434
*La ley de Ohm y el choque eléctrico* 435
23.5 Corriente directa y corriente alterna 437
*Conversión de CA a CD* 437
23.6 Rapidez y fuente de los electrones en un circuito 438
23.7 Potencia eléctrica 440
23.8 Lámparas 441
23.9 Circuitos eléctricos 441
*Circuitos en serie* 442
■ CELDAS DE COMBUSTIBLE 442
*Circuitos en paralelo* 443
*Circuitos en paralelo y sobrecarga* 445
*Fusibles de seguridad* 445

**24 Magnetismo 452**

24.1 Magnetismo 453
24.2 Polos magnéticos 454
24.3 Campos magnéticos 455
24.4 Dominios magnéticos 456
24.5 Corrientes eléctricas y campos magnéticos 458
■ PRACTICANDO LA FÍSICA 458
24.6 Electroimanes 459
*Electroimanes superconductores* 459
24.7 Fuerzas magnéticas 460
*Sobre las partículas cargadas en movimiento* 460
*Sobre los alambres portadores de corriente* 460
*Medidores eléctricos* 461
*Motores eléctricos* 462
24.8 El campo magnético de la Tierra 462
*Rayos cósmicos* 464
24.9 Biomagnetismo 465
■ IRM: IMÁGENES POR RESONANCIA MAGNÉTICA 465

**25 Inducción electromagnética 469**

25.1 Inducción electromagnética 470
25.2 Ley de Faraday 472
25.3 Generadores y corriente alterna 473
25.4 Producción de potencia 474
*Potencia de turbogenerador* 474
*Potencia MHD* 475
25.5 Transformadores 475
25.6 Autoinducción 478
25.7 Transmisión de potencia 479
25.8 Inducción de campo 479

PARTE SEIS

**Luz 485**

**26 Propiedades de la luz 486**

26.1 Ondas electromagnéticas 488
26.2 Velocidad de una onda electromagnética 488
26.3 El espectro electromagnético 489
■ ANTENAS FRACTALES 490
26.4 Materiales transparentes 491
26.5 Materiales opacos 493
*Sombras* 494
26.6 Viendo la luz: el ojo 496

**27 Color 504**

27.1 Color en el mundo 505
27.2 Reflexión selectiva 505
27.3 Transmisión selectiva 507
27.4 Mezcla de luces de colores 507
*Colores primarios* 508
*Colores complementarios* 509
27.5 Mezcla de pigmentos de colores 509
27.6 Por qué el cielo es azul 511
27.7 Por qué los atardeceres son rojos 512
■ PRACTICANDO LA FÍSICA 513
27.8 Por qué las nubes son blancas 514
27.9 Por qué el agua es azul verdoso 514

**28 Reflexión y refracción 519**

28.1 Reflexión 520
*Principio del tiempo mínimo* 520
28.2 La ley de reflexión 521
*Espejos planos* 522
*Reflexión difusa* 523

28.3 Refracción 524
*Índice de refracción* 526
*Espejismos* 526
28.4 La causa de la refracción 527
28.5 La dispersión y los arcoíris 529
28.6 Reflexión total interna 531
28.7 Lentes 533
*Formación de imágenes por una lente* 534
PRACTICANDO LA FÍSICA 535
28.8 Defectos en las lentes 537

**29 Ondas de luz 544**

29.1 Principio de Huygens 545
29.2 Difracción 547
29.3 Superposición e interferencia 549
29.4 Interferencia en películas delgadas 552
*Interferencia en películas delgadas de un solo color* 552
*Colores de interferencia* 553
PRACTICANDO LA FÍSICA 554
29.5 Polarización 555
*Visualización tridimensional* 557
29.6 Holografía 559

**30 Emisión de luz 562**

30.1 Emisión de luz 563
30.2 Excitación 564
30.3 Espectros de emisión 566
30.4 Incandescencia 567
30.5 Espectros de absorción 569
30.6 Fluorescencia 570
30.7 Fosforescencia 571
30.8 Lámparas 572
*Lámpara incandescente* 572
*Lámpara fluorescente* 572
*Lámpara fluorescente compacta* 573
*Diodo emisor de luz* 573
30.9 Láseres 574

**31 Cuantos de luz 582**

31.1 El nacimiento de la teoría cuántica 583
31.2 Cuantización y la constante de Planck 584
31.3 Efecto fotoeléctrico 585
31.4 Dualidad onda-partícula 588
31.5 Experimento de la doble rendija 588
31.6 Partículas como ondas: difracción de electrones 590
31.7 Principio de incertidumbre 592
31.8 Complementariedad 595
PREDICTIBILIDAD Y CAOS 596

PARTE SIETE

**Físicas atómica y nuclear 601**

**32 El átomo y el cuanto 602**

32.1 Descubrimiento del núcleo atómico 603
32.2 Descubrimiento del electrón 604
32.3 Espectros atómicos: pistas para la estructura atómica 606
32.4 Modelo de Bohr del átomo 607
32.5 Explicación de los niveles de energía cuantizados: ondas de electrones 608
32.6 Mecánica cuántica 610
32.7 Principio de correspondencia 611
BOSÓN DE HIGGS 612

**33 El núcleo atómico y la radiactividad 615**

33.1 Los rayos X y la radiactividad 616
33.2 Rayos alfa, beta y gamma 617
33.3 Radiación ambiental 619
*Unidades de radiación* 619
*Dosis de radiación* 620
*Trazadores radiactivos* 621
33.4 El núcleo atómico y la fuerza fuerte 622
33.5 Vida media radiactiva 625
33.6 Detectores de radiación 626
33.7 Transmutación de elementos 628
*Transmutación natural* 628
*Transmutación artificial* 630
33.8 Datación radiométrica 630
IRRADIACIÓN DE ALIMENTOS 632

**34 Fisión y fusión nucleares 637**

34.1 Fisión nuclear 639
34.2 Reactores de fisión nuclear 641
PLUTONIO 643
34.3 El reactor reproductor 644
34.4 Energía eléctrica mediante fisión 644
34.5 Equivalencia masa-energía 645

■ FÍSICA EN LA SEGURIDAD AEROPORTUARIA 649
34.6 Fusión nuclear 649
34.7 Cómo controlar la fusión 652

PARTE OCHO
Relatividad 657

35 Teoría de la relatividad especial 658
35.1 El movimiento es relativo 659
*El experimento de Michelson y Morley* 660
35.2 Postulados de la teoría de la relatividad especial 661
35.3 Simultaneidad 662
35.4 El espacio-tiempo y la dilatación del tiempo 663
■ LECTURA DEL TIEMPO DURANTE UN VIAJE EN TRANVÍA 667
*El viaje del gemelo* 668
35.5 Suma de velocidades 673
*Viaje espacial* 674
■ SALTOS CENTENARIOS 675
35.6 Contracción de la longitud 675
35.7 Cantidad de movimiento relativista 677
35.8 Masa, energía y $E = mc^2$ 678
35.9 Principio de correspondencia 680

36 Teoría de la relatividad general 686
36.1 Principio de equivalencia 687
36.2 Doblamiento de la luz por la gravedad 689
36.3 Gravedad y tiempo: corrimiento gravitacional al rojo 691
36.4 Gravedad y espacio: el movimiento de Mercurio 694
36.5 Gravedad, espacio y una nueva geometría 694
36.6 Ondas gravitacionales 696
36.7 Gravitación newtoniana y einsteiniana 697
Epílogo 701

APÉNDICE A
Sobre la medición y la conversión de unidades 703

APÉNDICE B
Más sobre el movimiento 709

APÉNDICE C
Elaboración de gráficas 713

APÉNDICE D
Aplicaciones de los vectores 716

APÉNDICE E
Crecimiento exponencial y tiempo de duplicación 719

Respuestas a problemas con número impar S-1
Glosario G-1
Créditos C-1
Índice I-1

# Álbum fotográfico de *Física conceptual*

*Física conceptual* es un libro muy personal, lo que se refleja en sus muchas fotografías de familiares y amigos, quienes se mezclan con colegas y amigos en todo el mundo. Muchas de estas personas están identificadas en las fotografías de apertura de capítulo y, con algunas excepciones, no repetiré sus nombres aquí. Sólo mencionaré a los familiares y amigos cuyas fotografías forman parte de las secciones de apertura. Comenzamos en la página 1, donde mi sobrino nieto Evan Suchocki sostiene un pollito mientras se sienta en mi regazo.

La Parte Uno abre en la página 19 con Charlotte Ackerman, la hija de mis amigos Duane Ackerman y Ellen Hum. La Parte Dos abre con Andrea Wu (quien también aparece en las páginas 131 y 492), hija de mi amigo en Hawái, Chiu Man Wu (página 322). La Parte Tres abre en la página 244 con el pequeño de cuatro años de edad, Francesco Ming Giovannuzzi, de Florencia, Italia, nieto de mis amigos Keith y Tsing Bardin (página 245). La Parte Cuatro, en la página 355, muestra a Abby Dijamco, hija de mi finada asistente de profesor CCSF, la dentista Stella Dijamco. En la Parte Cinco, en la página 405, está mi nieta Megan, hija de Leslie y Bob Abrams. La Parte Seis, en la página 485, abre con el sobrino de Lilian, Christopher Lee. La Parte Siete, página 452, muestra a William Davis, hijo de mis amigos Alan y Fe Davis. Mi nieta Grace Hewitt abre la Parte Ocho en la página 657.

Los amigos y colegas del City College de San Francisco abren varios capítulos y se mencionan en dichos espacios. Las fotografías que son figuras incluyen a Will Maynez, el diseñador y constructor de la pista de aire que se muestra en la página 100, quien aparece de nuevo asando un cacahuate en la página 298. Diana Lininger Markham se muestra en las páginas 29 y 159. Fred Cauthen suelta pelotas en la página 127.

Amigos instructores de física de otros colegios y universidades incluyen a Evan Jones, quien juega con Bernoulli en la página 264 y muestra la iluminación LED en la página 573. De Egipto, Mona El Tawil-Nassar ajusta las placas de un capacitor en la página 423. Sanjay Rebello, de la Kansas State University, Manhattan, aparece en la página 138. De Hawái, Walter Steiger aparece en la página 627. Chuck Stone muestra una rampa de energía en la página 185.

Amigos profesores de física de bachillerato incluyen al retirado Marshal Ellenstein, quien balancea el balde lleno de agua en la página 146, camina descalzo sobre vidrio roto en la página 263, y posa con Richard Feynman en la página 544. Otros profesores de física de Illinois son Ann Brandon, quien viaja en un colchón de aire en la página 268, y Tom Senior, quien hace música en la página 403.

Las fotografías familiares comienzan con mi esposa Lillian y conmigo, para mostrar que uno no puede tocar sin ser tocado, en la página 81. Otra fotografía actualizada que vincula lo conmovedor con la tercera ley de Newton muestra a mi hermano Stephen con su hija Gretchen en la página 87. El hijo de Stephen, Travis, está en la página 154, y su hija mayor, Stephanie, en las páginas 230, 543 y 686. Mi hijo Paul se muestra en las páginas 305 y 340. Mi nuera, Ludmila Hewitt, sostiene unos

Polaroids cruzados en la página 556. La encantadora mujer de la página 215 es mi hija Leslie Abrams, coautora en ciencias de la tierra de los libros *Conceptual Physical Science*. Esta colorida fotografía de Leslie ha sido la marca de *Física conceptual* desde la tercera edición. Una imagen más reciente de ella con su esposo, Bob, se presenta en la página 486. Sus hijos, Megan y Emily (página 554), junto con los hijos de Paul, Alex (página 90) y Grace (página 391), conforman el colorido conjunto de fotografías de la página 510. Las fotografías de mi finado hijo James están en las páginas 150, 394, y 536. Él me dejó a mi primer nieto, Manuel, quien se ve en las páginas 234 y 383. La abuela de Manuel, mi esposa Millie, quien murió en 2004, sostiene valientemente su mano sobre la olla de presión activa en la página 306. Mi hermano David y su esposa Barbara demuestran la presión atmosférica en la página 269. Su hijo, también David, electricista, está en la página 445, y el nieto John Perry Hewitt está en la página 276. Mi hermana Marjorie Hewitt Suchocki, escritora y teóloga emérita en la Claremont School of Theology, ilustra la reflexión en la página 522. El hijo de Marjorie, John Suchocki, autor de *Química conceptual*, quinta edición, y coautor de química de los libros *Conceptual Physical Science*, también es cantante y autor de canciones, conocido como John Andrew; él toca su guitarra en la página 472. El grupo que escucha la música en la página 399 es parte de la fiesta de bodas de John y Tracy; de izquierda a derecha: el finado Butch Orr, mi sobrina Cathy Candler (página 136 y su hijo Garth Orr en la página 226), la novia y el novio, mi sobrina Joan Lucas (página 39), mi hermana Marjorie, los padres de Tracy, Sharon y David Hopwood, los profesores Kellie Dippel y Mark Werkmeister, y yo.

Las fotografías de la familia de Lillian incluyen a su padre (mi suegro), Wai Tsan Lee, quien muestra la inducción magnética en la página 457, y a su madre (mi suegra), Siu Bik Lee, quien hace buen uso de la energía solar en la página 315. Mis sobrinos, Erik y Allison Wong, ilustran de manera dramática la termodinámica, en la página 346.

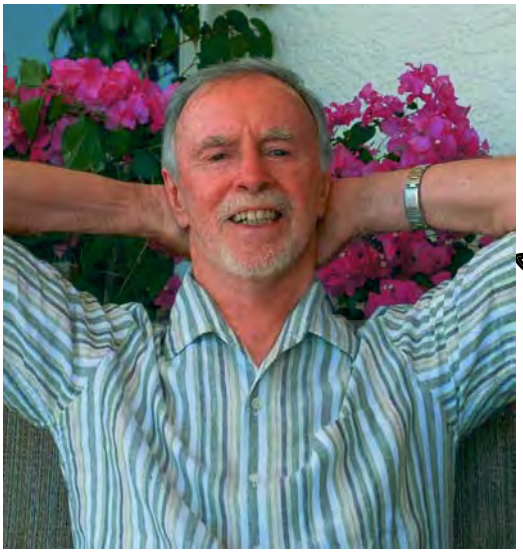
Mis amigos personales, que anteriormente fueron mis alumnos, comienzan con Tenny Lim, ingeniero aeroespacial en el Jet Propulsion Lab de Pasadena, quien tensa su arco en la página 115. Esta fotografía ha aparecido en cada libro desde la sexta edición. Ella se ve con su esposo Mark Clark, en Segways, en la página 144. Otro de mis protegidos es la científica aeroespacial Helen Yan, quien está involucrada en el desarrollo de sensores de formación de imágenes satelitales para Lockheed Martin en Sunnyvale, además de enseñar física de tiempo parcial en el CCSF (página 121), y nuevamente posa con Richard Feynman y Marshal Ellenstein en la página 544. En la página 150 Cliff Braun está en la extrema izquierda de mi hijo James en la figura 8.50, con mi sobrino Robert Baruffaldi en la extrema derecha. Alexei Cogan demuestra el centro de gravedad en la página 143, y la chica karateca de la página 95 es Cassy Cosme.

Tres queridos amigos de mis días de escuela son Howard Brand en la página 90, Dan Johnson en la página 336, y su esposa Sue en la página 39 (la primera remero en el bote). Bay, el nieto de Dan y Sue Johnson, toca el piano en la página 396. Otros queridos amigos son Ryan Patterson, quien resuena en la página 383, y Paul Ryan, el cual pasa su dedo a través de plomo fundido en la página 331. Mi influencia científica de los días de pintar letreros es Burl Grey, quien se muestra en la página 30 (con una discusión de pintar letreros en la página 27), y Jacques Fresco está en la página 133. Mi querido amigo Dennis McNelis come pizza en la página 309. Larry y Tammy Tunison usan dosímetros en la página 621 (los perros de Tammy están en la página 320). Greta Novak flota en agua muy densa en la página 263, y su hijo Bruce Novak muestra dos versiones del espectro de color en la página 489. Emily, la hija de Duane Ackerman, mira a través de novedosos lentes en la página 537. Peter Rea, de Arbor Scientific, está en la página 187. Paul Stokstad, de PASCO, se muestra en la página 132, y David y Christine Vernier, de Vernier Software, están en la página 109.

La inclusión de estas personas tan queridas para mí, hacen que *Física conceptual* sea aún más una obra de amor.

# Para el estudiante

Tú sabes que no puedes disfrutar un juego a menos que conozcas sus reglas; ya sea un juego de béisbol, un juego de computadora o simplemente un juego de mesa. Del mismo modo, no podrás apreciar por completo tu entorno hasta que comprendas las reglas de la naturaleza. La física es el estudio de dichas reglas, que muestran cómo todo en la naturaleza está hermosamente conectado. De modo que la principal razón para estudiar física es mejorar la forma en la que ves el mundo físico. Verás la estructura matemática de la física en ecuaciones frecuentes; pero, más que recetas para hacer cálculos, verás las ecuaciones como **guías para pensar**.



Yo disfruto la física, y tú también lo harás, porque la entenderás. De modo que busca comprender los conceptos mientras lees este libro. Tu comprensión de la física debe remontar el vuelo.

¡Disfruta tu física!

Paul G. Hewitt

# Para el instructor

La secuencia de capítulos en esta decimosegunda edición es idéntica a la de la edición anterior. Lo nuevo son los perfiles de personalidad extendidos al principio de cada capítulo, que destacan a un científico, profesor o figura histórica que complementa el material del capítulo. Cada capítulo comienza con un montaje fotográfico de profesores, y en ocasiones de sus hijos, quienes dan vida a la enseñanza de la física.

Como con la edición anterior, el Capítulo 1, "Acerca de la ciencia", comienza el curso con una nota alta al cubrir las primeras mediciones de la Tierra y las distancias hacia la Luna y el Sol. Se espera que las sorprendentes fotografías de mi esposa Lillian rodeada con manchas de luz en la acera abajo de un gran árbol resulten motivantes para uno de mis proyectos favoritos, que consiste en que los estudiantes investiguen las manchas redondas producidas por un pequeño orificio en un trozo de cartón sostenido en la luz solar, y luego vayan más allá para demostrar que mediciones simples conducen a descubrir el diámetro del Sol.

La Parte Uno, "Mecánica", comienza con el Capítulo 2, que, como en la edición anterior, presenta un breve panorama histórico de Aristóteles y Galileo, y avanza hacia la primera ley de Newton y hacia el equilibrio mecánico. Se introducen los vectores de fuerza principalmente para fuerzas que son mutuamente paralelas. Los vectores se extienden a la velocidad en el siguiente Capítulo 3, y en el Capítulo 5 se tratan los vectores tanto de fuerza como de velocidad y sus componentes.

El Capítulo 3, "Movimiento lineal", es el único capítulo de la Parte Uno que está desprovisto de leyes físicas. La cinemática no tiene leyes, sólo definiciones, principalmente para la *rapidez*, la *velocidad* y la *aceleración*, probablemente los conceptos menos excitantes que ofrece el curso. Con mucha frecuencia la cinemática se convierte en un "agujero negro" pedagógico en la educación: mucho tiempo para tan poca física. Al ser más matemática que física, las ecuaciones cinemáticas pueden parecerle al estudiante lo más intimidante del libro. Aunque el ojo experimentado no las ve como tales, los *estudiantes* las ven al principio inexplicables o inentendibles:

$$s = s_0 + \delta t$$
$$s = s_0 t + \tfrac{1}{2}\delta t^2$$
$$s^2 = s_0{}^2 + 2\delta s$$
$$s_a = \tfrac{1}{2}(s_0 + s)$$

Tradicionalmente, los cursos de física han dado mucho peso a la cinemática con poca o nula cobertura a la física moderna. El decaimiento radiactivo casi nunca consigue la atención que se le da a los cuerpos que caen. De modo que mi recomendación es pasar rápidamente a través del Capítulo 3, hacer la distinción entre velocidad y aceleración, y luego avanzar hacia el Capítulo 4, "Segunda ley de Newton de movimiento", donde los conceptos de velocidad y aceleración encuentran su aplicación.

El Capítulo 5 continúa con la tercera ley de Newton. En el Apéndice D se encuentra más acerca de vectores.

El Capítulo 6, "Cantidad de movimiento", es una extensión lógica de la tercera ley de Newton. Una razón por la que prefiero enseñarlo antes que enseñar energía es que los estudiantes encuentran $mv$ mucho más simple y fácil de entender que $\frac{1}{2}mv^2$. Otra razón para tratar primero la cantidad de movimiento es que los vectores de los capítulos previos se emplean con cantidad de movimiento, mas no con energía.

El Capítulo 7, "Energía", es un capítulo más largo, rico en ejemplos cotidianos y preocupaciones energéticas actuales. La energía es central para la mecánica, de modo que este capítulo tiene la mayor cantidad de material al final del capítulo (80 ejercicios).

Después de los Capítulos 8 y 9 (acerca de mecánica rotacional y gravedad), la mecánica culmina con el Capítulo 10 (acerca de movimiento de proyectiles y movimiento de satélites). Los estudiantes están fascinados por aprender que cualquier proyectil que se mueve suficientemente rápido puede convertirse en un satélite terrestre. Si se mueve incluso más rápido, puede convertirse en un satélite del Sol. El movimiento de proyectiles y el movimiento de satélites van de la mano.

La Parte Dos, "Propiedades de la materia", presenta capítulos acerca de átomos, sólidos, líquidos y gases, que en gran medida son iguales a la edición anterior. Nuevas aplicaciones, algunas bastante atractivas, aumentan el gusto de estos capítulos.

Las Partes de la Tres a la Ocho continúan, como las partes anteriores, con ejemplos enriquecidos de tecnología actual. La nueva iluminación con CFL y LED del Capítulo 23 tiene más tratamiento en el Capítulo 30. Los capítulos con menos cambios son los Capítulos 35 y 36, acerca de la relatividad especial y general, respectivamente.

Al final de cada una de las ocho partes hay un **Examen de práctica**, y la mayoría presenta 30 preguntas de opción múltiple. Las respuestas aparecen al final del libro, como en la edición anterior. Al final del libro se proporcionan las respuestas a los ejercicios con número impar, así como soluciones a *todo* el material de fin de capítulo.

Como con las ediciones anteriores, algunos capítulos incluyen ensayos breves en recuadros acerca de temas como energía y tecnología, ruedas de ferrocarril, bandas magnéticas en tarjetas de crédito, y trenes de levitación magnética. También se presentan recuadros acerca de pseudociencia, que culminan con el temor público acerca de la irradiación de alimentos y cualquier cosa nuclear. Para la persona que trabaja en la arena de la ciencia, quien sabe acerca del cuidado, la comprobación y la verificación cruzada que acompañan a la comprensión de algo, las malas interpretaciones pseudocientíficas son risibles. Pero para quienes no trabajan en la arena científica, incluidos incluso los mejores estudiantes, la pseudociencia puede parecer atractiva cuando los proveedores arropan sus mercaderías con el lenguaje de la ciencia mientras habilidosamente dejan a un lado las doctrinas de la ciencia. Esperamos ayudar a frenar esta creciente marea.

El material al final del capítulo comienza con un **Resumen de términos**. Después aparecen **Preguntas conceptuales** que resumen los puntos principales del capítulo. Los estudiantes pueden encontrar las respuestas a estas preguntas, palabra por palabra, en la lectura. Los ejercicios **Sustituye y listo** son para familiarizarse con las ecuaciones. Como se introdujo en ediciones anteriores, se han recibido muchos buenos comentarios acerca de los ejercicios **Piensa y clasifica**. Para comparar

cantidades en situaciones similares se requiere pensamiento crítico. Proporcionar una respuesta no es suficiente; la respuesta debe compararse con otras y se pide una clasificación de mayor a menor. Considero que esto es lo más valioso que se ofrece en el material al final del capítulo.

Los ejercicios **Piensa y explica** son las bases de la física conceptual. Muchos requieren pensamiento crítico, mientras que algunos están diseñados para conectar conceptos con situaciones familiares. La mayoría de los capítulos también tienen secciones **Piensa y discute** (que están diseñados para la discusión entre los estudiantes). En los conjuntos de ejercicios **Piensa y resuelve** se encuentran más desafíos físico-matemáticos. Estos problemas son mucho menos numerosos que los de Piensa y explica y los de Piensa y clasifica.

**SCREENCAST: Conservación de la cantidad de movimiento**

## Nuevas características en esta edición

La mayor adición a esta edición son los 147 **screencasts Hewitt-Drew-It** que se encuentran en el idioma inglés y se presentan en YouTube desde 2012. Los códigos QR a lo largo del libro vinculan al estudiante con estas lecciones de asesoría creadas por mí y embellecidas por mi esposa. Sentimos que estas lecciones son la aportación más reciente e importante para hacer la física correcta y comprensible. Complementan muy bien el material de capítulo de esta edición. Simplemente escanea los códigos QR en el libro con tu teléfono inteligente o dispositivo electrónico y una app para leer código QR. Después de escanear el código, podrás ver en línea los screencasts Hewitt-Drew-It. (Nota: Pueden aplicar cargos por uso de datos. El contenido de las lecciones en los screencasts está en inglés.)

Todavía se incluyen los perfiles de físicos o profesores de física de la edición anterior, con la inclusión de nuevas personas. Al aprender más acerca de las personas detrás del contenido del capítulo, el lector obtiene un gusto más personalizado de la física.

En esta edición se incluye más acerca de vectores de fuerza y de velocidad, así como del cambio climático. A lo largo del libro se encuentran nuevas actualizaciones acerca de la física actual. Nuevos recuadros incluyen impresión 3D, operación GPS y el bosón de Higgs.

El material al final de capítulo se reorganizó con numeración consecutiva para ayudar a asignar tareas en casa.

Considero a éste como el mejor libro de física que he escrito.

# Agradecimientos

Sigo estando enormemente agradecido con Ken Ford, quien revisó la precisión de esta edición y por sus muchas sugerencias perspicaces. Hace muchos años, admiré uno de los libros de Ken, *Basic Physics*, que fue el que me inspiró para escribir *Física conceptual*. En la actualidad, me siento honrado de que él haya dedicado tanto de su tiempo y de su energía para ayudar a hacer de esta edición un hermoso libro. Invariablemente, los errores surgen una vez enviado el manuscrito, de modo que yo asumo toda la responsabilidad por cualquier error que haya sobrevivido a su escrutinio.

Por sus lúcidas adiciones, agradezco a mi esposa Lillian, a Bruce Novak, Marshall Ellenstein y Evan Jones. Aprecio las sugerencias de Tomas Brage, J. Ronald Galli, John Hubisz, David Kagan, Sebastian Kuhn, Carlton Lane, Anne Tabor-Morris, Derek Muller, Fred Myers, Chris Thron, Jeff Wetherhold y P. O. Zetterberg.

Por las valiosas sugerencias realizadas en las ediciones anteriores, agradezco a mis amigos Dean Baird, Howard Brand, George Curtis, Alan Davis, Marshall Ellenstein, Mona El Tawil-Nassar, Herb Gottlieb, Jim Hicks, Peter Hopkinson, John Hubisz, Marilyn Hromatko, Dan Johnson, David Kagan, Juliet Layugan, Paul McNamara, Fred Myers, Diane Riendeau, Chuck Stone, Lawrence Weinstein y Phil Wolf. Otros que proporcionaron sugerencias en años anteriores son Matthew Griffiths, Paul Hammer, Francisco Izaguirre, Les Sawyer, Dan Sulke y Richard W. Tarara. Siempre estaré agradecido por los comentarios de mis amigos y colegas del Exploratorium: Judith Brand, Paul Doherty, Ron Hipschman, Eric Muller y Modesto Tamez.

Sigo agradecido con los autores de los libros que inicialmente sirvieron como influencia y referencia hace muchos años: Theodore Ashford, *From Atoms to Star*; Albert Baez, *The New College Physics: A Spiral Approach*; John N. Cooper y Alpheus W. Smith, *Elements of Physics*; Richard P. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*; Kenneth Ford, *Basic Physics*; Eric Rogers, *Physics for the Inquiring Mind*; Alexander Taffel, *Physics: Its Methods and Meanings*; UNESCO, *700 Science Experiments for Everyone*, y Harvey E. White, *Descriptive College Physics*.

También sigo agradecido con Robert Park, cuyo libro *Voodo Science* me motivó a incluir recuadros acerca de pseudociencia.

Estoy particularmente agradecido con mi esposa, Lillian Lee Hewitt, por sus nuevas fotografías y por la ayuda en todas las fases de la preparación del libro. Agradezco a mi sobrina Gretchen Hewitt Rojas por su ayuda en las fotografías. Mi más grande aprecio a Ken Ford y Bruce Novak, quienes brindaron especial atención a esta edición. Llevar a Bruce a bordo fue muy, muy afortunado.

Por su dedicación a esta edición, agradezco al personal de Addison Wesley en San Francisco. Estoy especialmente agradecido con Jim Smith, editor en jefe, y con Chandrika Madhavan, editor de proyecto. Agradezco a Cindy Johnson, gerente de proyecto, Carol Reitz, editora, y al equipo de producción de Cenveo Publisher Services por su paciencia con mis ediciones y revisiones de último minuto o con peticiones para afinación. ¡He sido bendecido con un equipo de primera línea!

Paul G. Hewitt
San Petersburgo, Florida

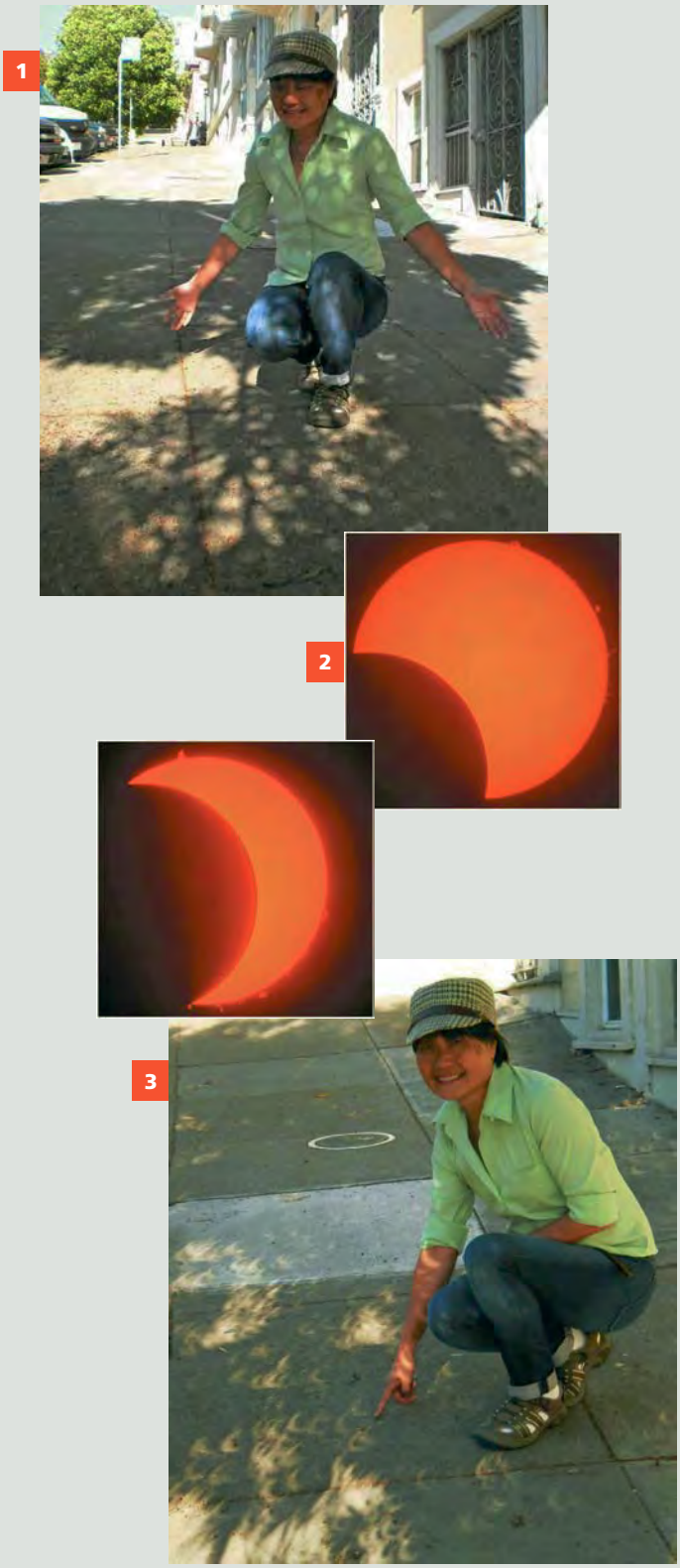
¡Caramba, tío abuelo Paul! Antes de que este pollito agotara los recursos de su espacio interior y asomara la cabeza por el cascarón, debió de haber pensado que estaba en sus últimos momentos. Pero lo que parecía su final, en realidad fue un nuevo comienzo. ¿Acaso somos como los pollitos, listos para asomar la cabeza a un nuevo ambiente y una nueva comprensión de nuestro lugar en el Universo?

1

CAPÍTULO 1

# Acerca de la ciencia

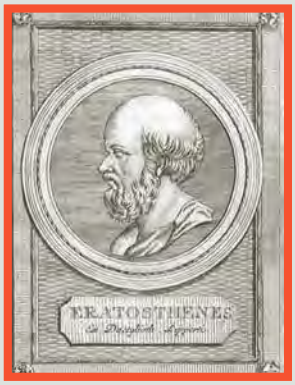

1.1 Mediciones científicas
1.2 Métodos científicos
1.3 Ciencia, arte y religión
1.4 Ciencia y tecnología
1.5 Física: la ciencia básica
1.6 En perspectiva


1 Las manchas circulares de luz que rodean a Lillian son imágenes del Sol proyectadas a través de los pequeños claros que se abren entre las hojas de los árboles arriba de ella. 2 La vista completa del Sol se bloquea a medida que la Luna avanza enfrente de él. 3 Las manchas circulares se vuelven crecientes durante el eclipse parcial de Sol.

Ser el segundo mejor no estuvo tan mal para el matemático griego Eratóstenes de Cirene (276-194 a. C.). Fue apodado "Beta" por sus contemporáneos, quienes lo consideraban el segundo mejor en muchos campos, incluidos matemáticas, filosofía, atletismo y astronomía. Tal vez obtuvo segundos lugares en competencias de atletismo o de lucha. Fue uno de los primeros bibliotecarios de la entonces biblioteca más importante del mundo, el Mouseion, en Alejandría, Egipto, fundada por Ptolomeo II Sóter. Eratóstenes fue uno de los académicos más destacados de su época y escribió sobre temas filosóficos, científicos y literarios. Su reputación entre sus contemporáneos era inmensa: Arquímedes le dedicó un libro. Como matemático, inventó un método para encontrar números primos. Como geógrafo, midió la inclinación del eje de la Tierra con gran exactitud y escribió *Geografía,* el primer libro que dio a la geografía una base matemática y que consideró a la Tierra como un globo dividido en latitudes y en zonas frías, templadas y tórridas.

Las obras clásicas de la literatura griega se resguardaban en el Mouseion, que era anfitrión de numerosos académicos y contenía cientos de miles de papiros y pergaminos. Pero este tesoro humano no era apreciado por todos. Mucha información contenida en el Mouseion entraba en conflicto con creencias muy valoradas que profesaban otros. Amenazada por sus "herejías", la gran biblioteca fue quemada y destruida por completo. Los historiadores no están seguros de quiénes fueron los responsables, que con seguridad se guiaron por la certeza de sus verdades.




Estar absolutamente cierto, no tener dudas en absoluto, es *certeza* la principal causa de mucha de la destrucción, humana y de otra índole, en los siglos que siguieron. Eratóstenes no presenció la destrucción de su gran biblioteca, porque tuvo lugar después de su muerte.

En la actualidad, Eratóstenes es más recordado por su sorprendente cálculo del tamaño de la Tierra, hecho con notable exactitud (hace 2,000 años, sin computadoras ni satélites artificiales, sólo con el uso de buen razonamiento, geometría y mediciones sencillas). En este capítulo verás cómo logró esto.

## 1.1 Mediciones científicas

Las mediciones son una característica distintiva de la buena ciencia. Cuánto sabes de algo suele guardar relación con cuán bien puedes medirlo. Esto lo estableció muy bien el famoso físico lord Kelvin en el siglo XIX: "Con frecuencia digo que, cuando puedes medir algo y expresarlo en números, entonces lo conoces un poco. Cuando no puedes medirlo, cuando no puedes expresarlo en números, tu conocimiento es escaso e insatisfactorio. Puede ser el comienzo del conocimiento, pero en tus razonamientos escasamente has avanzado a la etapa de la ciencia, cualquiera que esta sea". Las mediciones científicas no son algo nuevo, sino que se remontan a tiempos antiguos. Por ejemplo, en el siglo III a. C. se hicieron mediciones bastante exactas de los tamaños de la Tierra, la Luna y el Sol, así como de las distancias entre ellos.

### Cómo Eratóstenes midió el tamaño de la Tierra

El tamaño de la Tierra se midió por primera vez en Egipto, y lo hizo Eratóstenes, aproximadamente en el 235 a. C. Calculó la circunferencia de la Tierra de la siguiente manera. Sabía que el Sol alcanzaba su altura máxima en el cielo al mediodía del solsticio de verano (que ocurre alrededor del 21 de junio en los calendarios actuales). En ese momento, un poste vertical proyecta su sombra más corta. Si el Sol está directamente arriba del poste, un poste vertical no proyecta ninguna sombra en absoluto. Gracias a la información de la biblioteca, Eratóstenes supo que el Sol estaba directamente sobre su cabeza al mediodía del día del solsticio de verano en Cirene, una ciudad al sur de Alejandría (donde hoy se encuentra la presa Aswan). En ese momento en particular, la luz del Sol brilla directamente sobre un pozo profundo en Cirene, el cual devuelve su reflejo. Eratóstenes razonó que, si los rayos del Sol se prolongaran hacia el interior de la Tierra en ese momento, la atravesarían por el centro. Del mismo modo, una línea vertical que se prolongara hacia el interior de la Tierra en Alejandría (o en cualquier otro lugar) también pasaría por el centro de la Tierra.

**pti**

- Ciencia es el cuerpo de conocimiento que describe el orden dentro de la naturaleza y las causas de dicho orden. La ciencia también es una actividad humana continua que representa los esfuerzos, hallazgos y sabiduría colectivos de la raza humana, una actividad que se dedica a reunir conocimiento sobre el mundo y a organizarlo y condensarlo en leyes y teorías verificables. La ciencia tiene sus inicios antes de la historia escrita, cuando las personas descubrieron por primera vez las periodicidades y relaciones en la naturaleza, como patrones de estrellas en el cielo nocturno y patrones de clima: cuándo iniciaba la temporada lluviosa o cuándo los días eran más largos. Gracias a dichas periodicidades, las personas aprendieron a realizar predicciones que les dieron cierto control sobre sus entornos.

  La ciencia registró grandes adelantos en la Grecia de los siglos IV y III a. C., y se extendió por el mundo mediterráneo. El avance científico llegó casi a detenerse en Europa con la caída del Imperio Romano en el siglo V d. C. Hordas de bárbaros destruyeron casi todo lo que encontraron a su paso cuando invadieron Europa. La razón cedió su lugar a la religión, que condujo a Europa hacia las tinieblas de la Edad Media. Durante esta época, los chinos y polinesios elaboraban cartas estelares y planetarias, y las naciones árabes desarrollaban matemáticas y aprendían sobre la producción de vidrio, papel, metales y varios químicos. La ciencia griega se reintrodujo en Europa gracias a la influencia islámica que penetró en España durante los siglos X, XI y XII. En el siglo XIII surgieron universidades en Europa, y la introducción de la pólvora cambió la estructura social y política de Europa en el siglo XIV. En el siglo XV, Leonardo da Vinci mezcló bellamente el arte y la ciencia. El pensamiento científico se fomentó en el siglo XVI con el advenimiento de la imprenta.

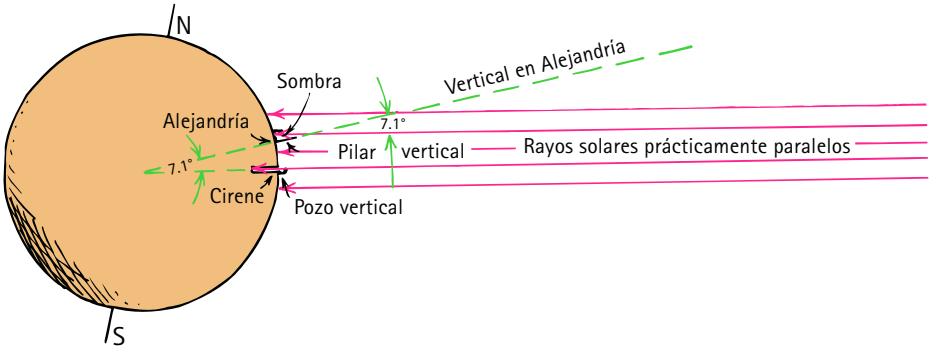



**FIGURA 1.1**
Cuando el Sol está directamente arriba en Cirene, no está justo por arriba en Alejandría, que se encuentra a 800 km al norte. Cuando los rayos del Sol brillan directamente en un pozo vertical en Cirene, proyectan la sombra de un pilar vertical en Alejandría. Las verticales en ambas ubicaciones se alargan hacia el centro de la Tierra, y forman el mismo ángulo que los rayos del Sol forman con el pilar en Alejandría. Eratóstenes midió este ángulo en 1/50 de círculo completo. Por tanto, la distancia entre Alejandría y Cirene es 1/50 la circunferencia de la Tierra.

Al mediodía del 22 de junio, Eratóstenes midió la proyección de la sombra de un pilar vertical en Alejandría y descubrió que medía 1/8 de la altura del pilar (Figura 1.1). Esto corresponde a un ángulo de 7.1° entre los rayos del Sol y el pilar vertical. Dado que 7.1° es 7.1/360, o aproximadamente 1/50 de círculo, Eratóstenes razonó que la distancia entre Alejandría y Cirene debía de ser 1/50 la circunferencia de la Tierra. Por tanto, la circunferencia de la Tierra se convierte en 50 veces la distancia entre estas dos ciudades. Los agrimensores midieron esta distancia, bastante plana y recorrida con frecuencia, en aproximadamente 5,000 estadios (800 kilómetros). De modo que Eratóstenes calculó la circunferencia de la Tierra en 50 × 5,000 estadios = 250,000 estadios. Esto se acerca mucho al valor aceptado en la actualidad para la circunferencia de la Tierra.

El mismo resultado se obtiene si se pasan completamente por alto los grados y se compara la longitud de la sombra proyectada por el pilar con la altura del pilar. El razonamiento geométrico muestra, con una buena aproximación, que la razón *longitud de sombra/altura de pilar* es la misma que la razón *distancia entre Alejandría y Cirene/radio de la Tierra*. De modo que, como el pilar es ocho veces mayor que su sombra, el radio de la Tierra debe ser ocho veces mayor que la distancia entre Alejandría y Cirene.

Dado que la circunferencia de un círculo es $2\pi$ veces su radio ($C = 2\pi r$), el radio de la Tierra es simplemente su circunferencia dividida entre $2\pi$. En unidades modernas, el radio de la Tierra mide 6,370 kilómetros y su circunferencia es 40,000 kilómetros.

## Tamaño de la Luna

Otro gran científico de la misma era fue Aristarco, quien probablemente fue el primero en sugerir que la Tierra gira sobre su eje una vez al día, lo que explicaba el movimiento diario de las estrellas. También formuló la hipótesis de que la Tierra se mueve alrededor del Sol en una órbita anual y que los demás planetas hacen lo mismo.[1] Aristarco calculó de manera correcta el diámetro de la Luna y su distancia respecto de la Tierra. Logró todo esto alrededor del año 240 a. C., 17 siglos antes de que sus hallazgos fueran aceptados por completo.

[1]Aristarco no estaba seguro de su hipótesis heliocéntrica, quizá porque las estaciones desiguales de la Tierra parecían no sustentar la idea de que la Tierra forma círculos alrededor del Sol. Lo más importante es que se observó que la distancia entre la Luna y la Tierra variaba, evidencia clara de que la Luna no forma círculos perfectos alrededor de la Tierra. Si la Luna no sigue una trayectoria circular alrededor de la Tierra, era difícil afirmar que la Tierra sigue una trayectoria circular alrededor del Sol. La explicación, las trayectorias elípticas de los planetas, no se descubrió sino hasta siglos después, y lo hizo Johannes Kepler. Mientras tanto, los epiciclos propuestos por otros astrónomos explicaban dichas discrepancias. Es interesante especular acerca del curso de la astronomía si la Luna no existiera. Su órbita irregular no habría contribuido al temprano descrédito de la teoría heliocéntrica, que acaso se hubiera afianzado siglos antes.

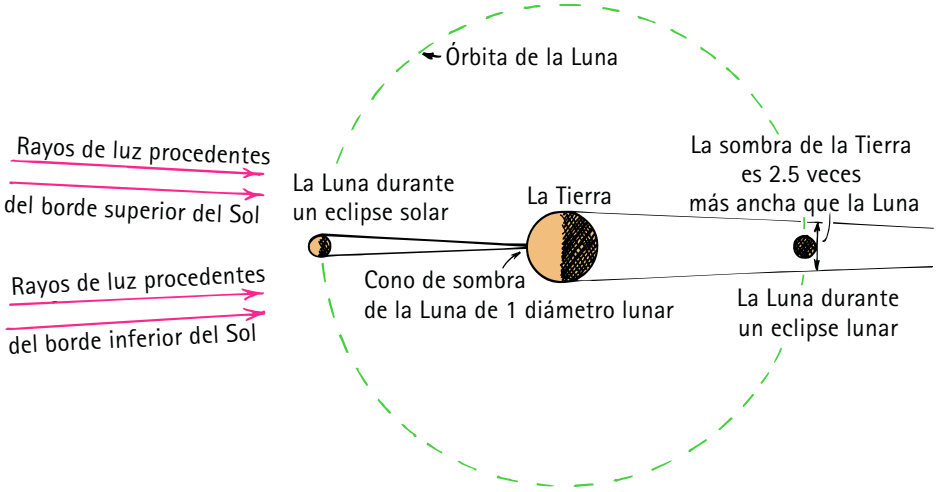



**FIGURA 1.2**
Durante un eclipse lunar se observa que la sombra de la Tierra es 2.5 veces más ancha que el diámetro de la Luna. Debido al gran tamaño del Sol, la sombra de la Tierra debe estrecharse para formar un cono. La cantidad de conicidad es evidente durante un eclipse solar, donde la sombra de la Luna forma un cono de todo el diámetro lunar, desde la Luna hasta la Tierra. De modo que la sombra de la Tierra forma un cono del mismo tamaño en la misma distancia. Por tanto, el diámetro de la Tierra debe ser 3.5 diámetros lunares.

Al observar un eclipse de Luna, Aristarco comparó el tamaño de la Tierra con el tamaño de la Luna. La Tierra, como cualquier cuerpo en la luz solar, proyecta una sombra. Un eclipse de Luna es simplemente el evento en el que la Luna pasa por esta sombra. Aristarco estudió con mucho cuidado este evento y descubrió que el ancho de la sombra de la Tierra sobre la Luna era 2.5 diámetros de Luna. Esto parecería indicar que el diámetro de la Luna es 2.5 veces menor que el de la Tierra. Pero, debido al enorme tamaño del Sol, la sombra de la Tierra forma un cono, como se demuestra durante un eclipse solar. (La Figura 1.2 muestra esto en escala exagerada.) En ese momento, la Tierra intercepta la sombra de la Luna, pero apenas. El cono de la sombra de la Luna es casi un punto sobre la superficie terrestre, prueba de que el cono de la sombra de la Luna a esta distancia es un diámetro lunar. De modo que, durante un eclipse lunar, la sombra de la Tierra, que cubre la misma distancia, también debe formar un cono de un diámetro lunar. Si se tiene en cuenta el cono de los rayos del Sol, el diámetro de la Tierra debe ser (2.5 + 1) veces el diámetro de la Luna. De esta forma, Aristarco mostró que el diámetro de la Luna es 1/3.5 el de la Tierra. El diámetro actualmente aceptado de la Luna es 3,640 km, que se encuentra dentro de 5% del valor calculado por Aristarco.

**FIGURA 1.3**
Escala correcta de eclipses solar y lunar, que muestra por qué un alineamiento perfecto de Sol, Luna y Tierra es tan poco frecuente. (Los eclipses incluso son menos frecuentes porque la órbita de la Luna está inclinada aproximadamente 5° respecto del plano en que se encuentra la órbita de la Tierra alrededor del Sol.)

## Distancia a la Luna

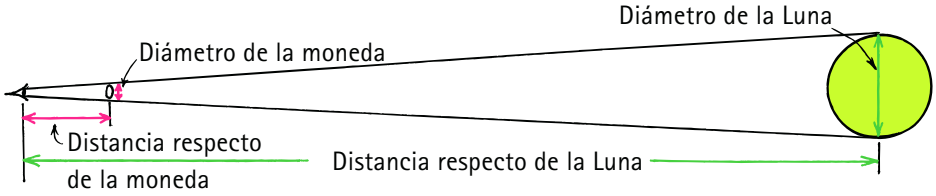
Pega con cinta una pequeña moneda a una ventana y obsérvala con un ojo de modo que apenas bloquee la Luna llena. Esto ocurre cuando tu ojo está a una distancia aproximada de 110 diámetros de moneda. Entonces, la razón de *diámetro de moneda/distancia de la moneda* es aproximadamente 1/110. El razonamiento geométrico derivado de los triángulos similares muestra que ésta también es la proporción entre *diámetro de la Luna/distancia de la Luna* (Figura 1.4). De modo que la distancia entre tú y la Luna es 110 veces el diámetro de la Luna. Los antiguos griegos lo sabían. La medición de Aristarco del diámetro de la Luna fue todo lo que se necesitó para calcular la distancia Tierra-Luna. De manera que los antiguos griegos conocían tanto el tamaño de la Luna como su distancia respecto de la Tierra.

Con esta información, Aristarco calculó la distancia Tierra-Sol.

**pti**

- El astrónomo polaco del siglo XVI, Nicolás Copérnico, causó gran controversia cuando publicó un libro que proponía que el Sol estaba estacionario y que la Tierra giraba alrededor del Sol. Estas ideas entraron en conflicto con la idea popular de que la Tierra era el centro del Universo. También entraron en conflicto con las enseñanzas de la Iglesia y fueron prohibidas durante 200 años. El físico italiano Galileo Galilei fue arrestado por popularizar la teoría copernicana y por algunos descubrimientos astronómicos propios. Sin embargo, un siglo después, las ideas de Copérnico y de Galileo se aceptaron de manera generalizada.

  Esta clase de ciclo ocurre época tras época. A principios del siglo XIX, los geólogos sufrieron una violenta condena porque disentían con el relato del Génesis acerca de la creación. Más tarde, en el mismo siglo, se aceptó la geología, pero las teorías de la evolución fueron censuradas y se prohibió su enseñanza. Cada época tiene sus grupos de rebeldes intelectuales que son desaprobados y en ocasiones perseguidos en el momento, pero que después parecen inofensivos y con frecuencia esenciales para la elevación de las condiciones humanas. Como dijo sabiamente el conde M. Maeterlinck: "en cada encrucijada del camino que conduce hacia el futuro, a cada espíritu progresivo se oponen mil hombres dispuestos a defender el pasado".




$$\frac{\text{Diámetro de la moneda}}{\text{Distancia respecto de la moneda}} = \frac{\text{Diámetro de la Luna}}{\text{Distancia respecto de la Luna}} = \frac{1}{110}$$

**FIGURA 1.4**
Un ejercicio de proporciones. Cuando la moneda apenas "eclipsa" la Luna, la proporción entre diámetro de la moneda y distancia entre tú y la moneda es igual a la proporción entre diámetro de la Luna y distancia entre tú y la Luna (aquí no está a escala). Las mediciones dan una cifra de 1/110 para ambas proporciones.

## Distancia al Sol

Si repitieras el ejercicio de la moneda y la Luna con el Sol (lo que sería peligroso debido a la brillantez del Sol), adivina qué: la razón *diámetro del Sol/distancia al Sol* también es 1/110. Esto se debe a que los tamaños del Sol y la Luna son iguales al ojo. Ambos forman un cono con el mismo ángulo (aproximadamente 0.5°). Sin embargo, si bien los antiguos griegos conocían la proporción entre diámetro y distancia, el diámetro solo o la distancia sola tenían que determinarse por otros medios. Aristarco descubrió un método para hacerlo. He aquí lo que hizo.

Aristarco observó la fase de la Luna cuando era *exactamente* media Luna, con el Sol todavía visible en el cielo. Entonces la luz solar debía caer sobre la Luna en ángulos rectos respecto de su línea de visión. Esto significaba que las líneas entre la Tierra y la Luna, entre la Tierra y el Sol, y entre la Luna y el Sol, forman un triángulo recto (Figura 1.5).

Una regla de trigonometría establece que, si conoces todos los ángulos en un triángulo recto, más la longitud de alguno de sus lados, puedes calcular la longitud de cualquier otro lado. Aristarco conocía la distancia entre la Tierra y la Luna. Al momento de la media Luna también conocía uno de los ángulos, 90°. Todo lo que tuvo que hacer fue medir el segundo ángulo entre la línea de visión a la Luna y la línea de visión al Sol. Entonces, el tercer ángulo, uno muy pequeño, es 180° menos la suma de los dos primeros ángulos (la suma de los ángulos en cualquier triángulo = 180°).

Es difícil medir el ángulo entre las líneas de visión a la Luna y al Sol sin un tránsito moderno. Por un lado, tanto el Sol como la Luna no son objetos puntuales, sino relativamente grandes. Aristarco tenía que mirar hacia sus centros (o cualquier borde) y medir el ángulo intermedio, ¡bastante grande, casi un ángulo recto en sí mismo! Para los estándares de la época moderna, su medición fue muy imperfecta. Midió 87°, en tanto que el verdadero valor es 89.8°. Pensó que el Sol estaba a aproximadamente 20 veces la distancia a la Luna, cuando de hecho está a aproximadamente 400 veces dicha distancia. De modo que, aunque su método era ingenioso, sus mediciones no fueron

El Sol está directamente sobre tu cabeza a mediodía sólo en el ecuador. Si estás de pie en la luz solar en el ecuador, no proyectas ninguna sombra. En ubicaciones más alejadas del ecuador, el Sol nunca está directo sobre tu cabeza a mediodía. Cuanto más lejos estés del ecuador, más larga será la sombra que proyecte tu cuerpo.

**SCREENCAST: Imágenes a través de orificios**

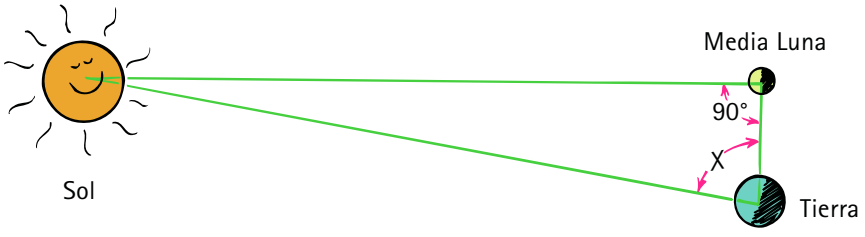



**FIGURA 1.5**
Cuando la Luna aparece exactamente como medio llena, Sol, Luna y Tierra forman un triángulo recto (no a escala). La hipotenusa es la distancia Tierra-Sol. Por simple trigonometría puedes encontrar la hipotenusa de un triángulo recto si conoces el tamaño de cualquier ángulo no recto y la longitud de un lado. La distancia Tierra-Luna es un lado de longitud conocida. Mide el ángulo *X* y podrás calcular la distancia Tierra-Sol.

perfectas. Quizás a Aristarco se le hacía difícil creer que el Sol estuviera tan lejos, y erró en el lado más cercano. No se sabe.

En la actualidad se sabe que el Sol está a un promedio de 150,000,000 km de la Tierra. Está un poco más cerca de la Tierra en diciembre (147,000,000 km) y un poco más alejado en junio (152,000,000 km).

## Tamaño del Sol

Una vez conocida la distancia al Sol, la razón diámetro/distancia de 1/110 permite medir el diámetro del Sol. Otra forma de medir la proporción 1/110, además del método de la Figura 1.4, es medir el diámetro de la imagen del Sol proyectada a través de una abertura minúscula. Deberías intentarlo. Pincha un agujero en una hoja de cartulina opaca y deja que la luz solar brille sobre él. La imagen redonda que se proyecta sobre la superficie que está abajo en realidad es una imagen del Sol. Verás que el tamaño de la imagen no depende del tamaño del orificio sino, más bien, de cuán alejado esté el orificio de la imagen. Agujeros más grandes forman imágenes más brillantes, no más grandes. Desde luego, si el orificio es muy grande, no se forma ninguna imagen. Una medición cuidadosa mostrará que la proporción entre el tamaño de la imagen y la distancia que hay al orificio es 1/110, igual que la razón que hay entre el *diámetro del Sol y la distancia entre el Sol y la Tierra* (Figura 1.6).

Es interesante que en el momento de un eclipse solar parcial, la imagen proyectada por el orificio sea una forma creciente, la misma que la del Sol cubierto parcialmente. Ésta es otra forma de ver un eclipse parcial sin mirar al Sol.

¿Has notado que las manchas de la luz solar que ves en el suelo debajo de un árbol son perfectamente redondas cuando el Sol está justo arriba, y se extienden en forma de elipses cuando el Sol está bajo en el cielo? Se trata de imágenes del Sol que atraviesan agujeros pequeños, donde la luz brilla a través de aberturas en las hojas que son pequeñas en comparación con la distancia que hay al suelo. Una mancha redonda de 10 centímetros de diámetro se proyecta por una abertura que está a 110 × 10 cm arriba del suelo. Los árboles altos forman imágenes grandes; los árboles bajos forman imágenes pequeñas. Y, en el momento de un eclipse solar parcial, las imágenes son crecientes (Figura 1.7).

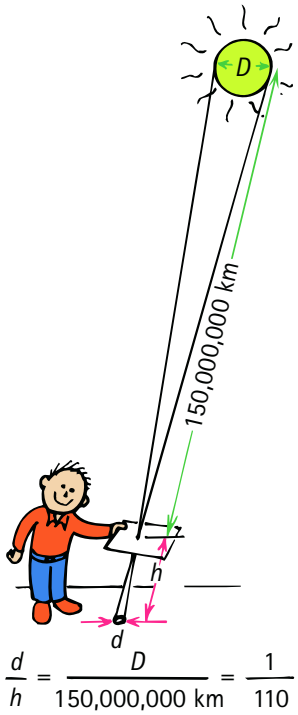



**FIGURA 1.6**
La mancha redonda de luz proyectada por el orificio es una imagen del Sol. Su razón *diámetro/distancia* es la misma que la razón *diámetro del Sol/distancia Tierra-Sol*, 1/110. El diámetro del Sol es 1/110 su distancia a la Tierra.

**FIGURA 1.7**
Las manchas de luz solar con forma de crecientes son imágenes del Sol cuando está parcialmente eclipsado.

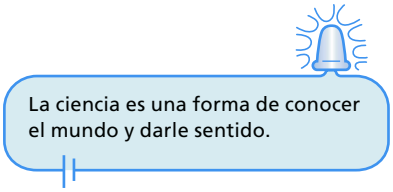
**FIGURA 1.8**
Renoir pintó con precisión las manchas de luz solar sobre la ropa y los alrededores de sus sujetos: imágenes del Sol proyectadas por aberturas relativamente pequeñas formadas por las hojas que están en lo alto.

## Matemáticas: el lenguaje de la ciencia

La ciencia y las condiciones humanas avanzaron en forma espectacular después de que la ciencia y las matemáticas se integraron hace alrededor de cuatro siglos. Cuando las ideas de la ciencia se expresan en términos matemáticos, no tienen ambigüedades. Las ecuaciones de la ciencia ofrecen expresiones concisas de relaciones entre conceptos. No tienen los muchos significados que suelen causar confusión cuando se analizan las ideas expresadas en lenguaje común. Cuando los hallazgos en la naturaleza se expresan en términos matemáticos, son más fáciles de verificar o de desacreditar con experimentos. La estructura matemática de la física será evidente en las muchas ecuaciones que encontrarás a lo largo de este libro. Las ecuaciones son guías para el pensamiento que muestran las conexiones entre los conceptos de la naturaleza. Los métodos de las matemáticas y la experimentación condujeron a un enorme éxito en la ciencia.[2]

# 1.2 Métodos científicos

No existe *el* método científico. Pero sí hay características comunes en la manera como los científicos hacen su trabajo. Todas éstas se remontan a los tiempos del físico italiano Galileo Galilei (1564-1642) y del filósofo inglés Francis Bacon (1561-1626). Ellos se desvincularon de los métodos de los griegos, quienes trabajaron "hacia arriba o hacia abajo", de acuerdo con las circunstancias, y llegaron a conclusiones acerca del mundo físico con un razonamiento basado en suposiciones arbitrarias (axiomas). El científico moderno trabaja "hacia arriba": primero examina la forma como funciona realmente el mundo y luego construye una estructura que explique los hallazgos.




Si bien no hay una sola descripción del **método científico** que sea realmente adecuada, es probable que se observen algunos o todos estos pasos en la manera como la mayoría de los científicos realiza su trabajo.

1. Reconocer una pregunta o un acertijo, como un hecho inexplicado.
2. Formular una conjetura educada, una **hipótesis**, que pueda resolver el acertijo.
3. Predecir las consecuencias de la hipótesis.
4. Realizar experimentos o cálculos para poner a prueba las predicciones.
5. Formular la regla general más simple que organiza los tres ingredientes principales: hipótesis, efectos predichos y hallazgos experimentales.

Aunque estos pasos son interesantes, gran parte del progreso en la ciencia ha provenido del ensayo y error, experimentaciones sin hipótesis o sólo simples descubrimientos accidentales de una mente bien preparada. El éxito de la ciencia descansa más en una actitud que comparten los científicos que en un método particular. Esta **actitud científica** es de análisis, integridad y humildad, es decir, la voluntad de admitir errores.

## La actitud científica

Suele pensarse que un hecho es algo que no cambia y es absoluto. Pero, en ciencia, un **hecho**, por lo general, es un acuerdo estricto entre observadores competentes que hacen una serie de observaciones acerca del mismo fenómeno. Por ejemplo, aunque alguna vez era un hecho que el universo era invariable y permanente, en la actualidad es un hecho que el universo se expande y evoluciona. Una hipótesis científica, por otra parte, es una conjetura informada que sólo se presume factual hasta que se respalda con experimentos. Cuando una hipótesis se pone a prueba una y otra vez y no se contradice, puede llegar a conocerse como **ley** o *principio.*

[2] Hay una diferencia entre la estructura matemática de la física y la práctica de la resolución de problemas matemáticos: el enfoque de la mayoría de los cursos no conceptuales. Observa el número relativamente pequeño de problemas al final de los capítulos de este libro, comparados con el número de ejercicios. La atención se centra en la comprensión cómodamente antes del cálculo. En el libro auxiliar *Resolución de problemas de física conceptual* hay problemas adicionales.

Si un científico encuentra evidencias que contradicen una hipótesis, ley o principio, entonces, en el espíritu científico, tiene que cambiarse o abandonarse, sin importar la reputación o autoridad de las personas que la defiendan (a menos que la evidencia contradictoria, al ponerse a prueba, resulte estar equivocada... lo que a veces ocurre). Por ejemplo, el enormemente respetado filósofo griego Aristóteles (384-322 a. C.) afirmó que un objeto cae con una rapidez proporcional a su peso. Esta idea se sostuvo como válida durante casi 2,000 años, debido a la decisiva autoridad de Aristóteles. Se dice que Galileo mostró la falsedad de la afirmación de Aristóteles con un experimento: demostró que los objetos pesados y ligeros soltados desde la torre inclinada de Pisa caían casi con la misma rapidez. En el espíritu científico, un solo experimento verificable que pruebe lo contrario supera a cualquier autoridad, sin importar la reputación o el número de seguidores o defensores. En la ciencia moderna, el argumento por apelación a la autoridad tiene poco valor.[3]

Los científicos tienen que aceptar sus hallazgos experimentales aun cuando les gustaría que fueran diferentes. Deben luchar por distinguir entre lo que ven y lo que quieren ver, porque los científicos, al igual que toda la gente, tienen una gran capacidad para engañarse.[4] Las personas siempre han tendido a adoptar reglas generales, creencias, credos, ideas e hipótesis sin cuestionar a fondo su validez, y a conservarlas mucho tiempo después de que se ha demostrado que no tienen sentido, son falsas o al menos cuestionables. Las suposiciones más generalizadas suelen ser las menos cuestionadas. Es muy frecuente que, cuando se adopta una idea, se preste atención particular a casos que parecen sustentarla, al tiempo que se distorsionan, minimizan o ignoran los casos que parecen refutarla.

Los científicos usan la palabra *teoría* en una forma que difiere de su uso en el habla cotidiana. En el habla cotidiana, una teoría no es diferente de una hipótesis: una suposición que no se ha verificado. Una **teoría** científica, por otra parte, es una síntesis de un gran cuerpo de información que abarca hipótesis bien comprobadas y verificadas acerca de ciertos aspectos del mundo natural. Los físicos, por ejemplo, hablan de la teoría de quarks del núcleo atómico, los químicos hablan de la teoría de los enlaces metálicos en los metales y los biólogos hablan de la teoría celular.

Las teorías de la ciencia no son fijas; más bien, experimentan cambios. Las teorías científicas evolucionan conforme pasan por etapas de redefinición y refinamiento. Durante los pasados cientos de años, por ejemplo, la teoría del átomo se ha ido perfeccionando de manera repetida a medida que se recopilan nuevos datos sobre el comportamiento atómico. De igual modo, los químicos han perfeccionado sus ideas sobre la manera como se enlazan las moléculas y los biólogos han perfeccionado la teoría celular. El perfeccionamiento de las teorías es una fortaleza de la ciencia, no una debilidad. Muchas personas piensan que cambiar de opinión es una señal de debilidad. Los científicos competentes deben ser expertos en cambiar de opinión. Sin embargo, sólo cambian de opinión cuando se confrontan con evidencia experimental sólida o cuando una hipótesis conceptualmente más simple los obliga a adoptar un nuevo punto de vista. Más importante que defender las creencias es mejorarlas. Quienes son honestos ante la evidencia experimental formulan las mejores hipótesis.

Los experimentos, no la discusión filosófica, deciden qué es correcto en ciencia.

Lejos de su profesión, los científicos no son intrínsecamente más honestos o éticos que la mayoría de las personas. Pero en su profesión trabajan en un terreno que valora mucho la honestidad. La regla cardinal en ciencia es que todas las hipótesis deben ser verificables: deben ser susceptibles, al menos en principio, de demostrarse que son *equivocadas.* En ciencia, es más importante que haya un medio de probar que una idea es errónea, que un medio para probar que es correcta. Éste es un factor principal que distingue a la ciencia de la no ciencia. Al principio esto puede parecer extraño, porque cuando uno se pregunta acerca de la mayoría de las cosas, uno se preocupa por las formas de descubrir si son verdaderas. Las hipótesis científicas son diferentes. De hecho,

[3]Pero apelar a la *belleza* tiene valor en ciencia. Más de un resultado experimental en tiempos modernos ha contradicho una teoría magnífica que, al someterse a mayor investigación, resultó estar equivocada. Esto refuerza la fe de los científicos en que, a final de cuentas, la descripción correcta de la naturaleza involucra concisión de la expresión y economía de conceptos, una combinación que merece llamarse bella.

[4]En tu formación académica no es suficiente estar atento a que otras personas puedan tratar de engañarte; es más importante estar atento a tu propia tendencia a engañarte a ti mismo.

si quieres distinguir si una hipótesis es científica o no, revisa si hay una prueba que demuestre que está equivocada. Si no hay una prueba de su posible falsedad, entonces la hipótesis no es científica. Albert Einstein lo planteó bien cuando afirmó: "ningún número de experimentos puede demostrar que estoy en lo correcto; un solo experimento puede demostrar que estoy equivocado".

Considera la hipótesis del biólogo Charles Darwin de que las formas de vida evolucionaron de las formas más simples a las más complejas. Podría demostrarse que esta hipótesis es incorrecta si los paleontólogos descubrieran que las formas más complejas de vida aparecieron antes que sus contrapartes más simples. Einstein formuló la hipótesis de que la luz se dobla por la gravedad. Podría demostrarse que esto es erróneo si la luz de las estrellas que roza el Sol y puede verse durante un eclipse solar no se desviara de su trayectoria normal. Como resultó ser, las formas de vida menos complejas anteceden a sus contrapartes más complejas y la luz de las estrellas se dobla cuando pasa cerca del Sol, lo que sustenta las afirmaciones. Si en algún momento una hipótesis o afirmación científica se confirma, entonces ésta se considera útil y constituye un peldaño más en la construcción de conocimiento adicional.

La esencia de la ciencia se expresa en dos preguntas: ¿de qué manera se podría obtener conocimiento? y ¿qué evidencia demostraría que esta idea está equivocada? Las afirmaciones sin evidencia no son científicas y pueden desecharse sin evidencia.

Considera la hipótesis que afirma que "la alineación de los planetas en el cielo determina el mejor momento para tomar decisiones". Muchas personas lo creen, pero esta hipótesis no es científica. No se puede demostrar que es equivocada, ni se puede demostrar que es correcta. Es *especulación*. Del mismo modo, la hipótesis que dice que "en otros planetas en alguna parte del universo existe vida inteligente" no es científica. Aunque puede demostrarse que es correcta si se verifica un solo ejemplo de vida inteligente existente en alguna parte del universo, no hay forma de demostrar que es equivocada si no se encuentra vida inteligente jamás. Si se buscara en lo más profundo del universo durante eones y no se encontrara vida, eso no probaría que no existe "a la vuelta de la esquina". Por otra parte, la hipótesis que afirma que "no hay otra vida inteligente en el universo" *es* científica. ¿Ves por qué?

Ser científico es estar abierto a nuevo conocimiento.

Una hipótesis que puede demostrarse que es correcta pero que no puede demostrarse que es incorrecta no es una hipótesis científica. Muchos de estos enunciados son bastante razonables y útiles, pero se encuentran fuera del dominio de la ciencia.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Cuál de las siguientes es una hipótesis científica?**

**a. Los átomos son las partículas de materia más pequeñas que existen.**

**b. El espacio está permeado con una esencia que es indetectable.**

**c. Albert Einstein fue el físico más grandioso del siglo XX.**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Sólo el enunciado *a* es científico, porque hay una prueba de su falsedad. El enunciado no sólo *puede demostrarse* que es equivocado, sino que, de hecho, *se ha* demostrado que es equivocado. El enunciado *b* no tiene prueba de su posible falsedad y, por tanto, no es científico. Sucede lo mismo con cualquier principio o concepto para el cual no haya medios, procedimientos o pruebas mediante los cuales pueda demostrarse que es equivocado (si es que está equivocado). Algunos pseudocientíficos y otros farsantes del conocimiento incluso ni siquiera tendrán en cuenta una prueba de la posible falsedad de sus enunciados. El enunciado *c* es una afirmación que no tiene prueba de su posible falsedad. Si Einstein no fue el físico más grandioso, ¿cómo podrías saberlo? Es importante observar que, dado que el nombre Einstein por lo general se tiene en alta estima, es un favorito de los pseudocientíficos. De modo que no debe sorprenderte que el nombre de Einstein, como el de Jesús o el de cualquiera otra persona muy respetada, sea citado con frecuencia por charlatanes que quieren ganarse el respeto de los demás hacia su persona y hacia sus puntos de vista. En todos los campos es prudente ser escéptico de quienes desean ganar reconocimiento apelando a la autoridad de otros.

Nadie tiene el tiempo, la energía o los recursos para poner a prueba cada idea, de modo que la mayor parte del tiempo uno cree en la palabra de alguien más. ¿Cómo sabes a quién creerle? Para reducir la probabilidad de error, los científicos sólo creen en la palabra de aquellos cuyas ideas, teorías y hallazgos son verificables, si no en la práctica, al menos en principio. Las especulaciones que no se pueden poner a prueba se consideran como "no científicas". En el largo plazo, esto obliga a que haya honestidad: los hallazgos ampliamente divulgados entre los colegas científicos por lo general se sujetan a una mayor cantidad de pruebas. Tarde o temprano se encuentran los errores (y las falacias); se exponen las vanas ilusiones. Un científico desacreditado no consigue una segunda oportunidad en la comunidad de científicos. El castigo por fraude es la excomunión profesional. En consecuencia, la honestidad, tan importante para el avance de la ciencia, se vuelve materia de interés propio para los científicos. Existe relativamente poca fanfarronería en un juego en el que se apuesta todo. En los campos de estudio donde lo correcto y lo incorrecto no se establecen con tanta facilidad, la presión por ser honesto es mucho menor.

Se puede aprender mucho cuando se plantean preguntas. Sócrates predicó esto, y de ahí surgió el método socrático. El planteamiento de preguntas ha conducido a algunas de las obras más magníficas del arte y la ciencia.

Las ideas y conceptos más importantes para la vida diaria con frecuencia no son de carácter científico; su exactitud o inexactitud no pueden determinarse en el laboratorio. Resulta muy interesante que parece que las personas creen honestamente que sus propias ideas acerca de las cosas son correctas, y casi todos tienen amistad con personas que sostienen visiones completamente opuestas, de modo que las ideas de alguno de ellos (o de todos) deben ser incorrectas. ¿Cómo sabes si *tú* eres, o no, uno de los que tienen creencias erróneas? Existe una prueba. Antes de estar razonablemente convencido de que estás en lo correcto acerca de una idea particular, debes estar seguro de que entiendes las objeciones y las posiciones de tus antagonistas más elocuentes. Debes descubrir si tus opiniones están respaldadas por un conocimiento sólido formado por ideas opuestas o por tus *malas interpretaciones* acerca de las ideas contrarias. Para hacer esta distinción ve si puedes exponer las objeciones y posiciones de tus oponentes de modo que sean satisfactorias para *ellos*. Incluso si logras hacerlo, no puedes estar absolutamente seguro de estar en lo correcto acerca de tus propias ideas, pero la probabilidad de estar en lo correcto es considerablemente mayor si pasas esta prueba.

Cada quién necesita un filtro de conocimiento para decir la diferencia entre lo que es válido y lo que sólo pretende ser válido. El mejor filtro de conocimiento jamás inventado es la ciencia.

**PUNTO DE CONTROL**

**Supón que, en un desacuerdo entre dos amigos, A y B, observas que el amigo A sólo enuncia y vuelve a enunciar un solo punto de vista, en tanto que el amigo B expone con claridad tanto su propia posición como la del amigo A. ¿Quién es más probable que tenga la razón? *(¡Piensa antes de leer la respuesta abajo!)***

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

¿Quién puede saberlo? Quizás el amigo B tenga la agudeza de un abogado que puede expresar varios puntos de vista y aun así estar equivocado. No puedes estar seguro acerca del "otro chico". La prueba de corrección o incorrección aquí sugerida no es una prueba de los demás, sino es una prueba de ti y para *ti*. Puede ayudar a tu desarrollo personal. Cuando intentes articular las ideas de tus antagonistas, debes estar preparado, como los científicos que están preparados para cambiar de opinión, para descubrir evidencia contraria a tus propias ideas, evidencia que puede alterar tus opiniones. El crecimiento intelectual suele ocurrir de esta manera.

Si bien la noción de estar familiarizado con los puntos de vista contrarios parece razonable para la mayoría de la gente pensante, es precisamente lo opuesto (blindarse a uno mismo y a los demás contra las ideas contrarias) lo que se ha practicado más ampliamente. A uno se le enseña a desacreditar las ideas impopulares sin comprenderlas en el contexto adecuado. Con la visión retrospectiva 20/20 se puede ver que muchas

de las "verdades profundas" que fueron las piedras angulares de civilizaciones enteras fueron reflejos superficiales de la ignorancia prevaleciente de la época. Muchos de los problemas que plagaron las sociedades surgieron de esta ignorancia y de las malas interpretaciones resultantes; gran parte de lo que se sostuvo como cierto simplemente no lo era. Esto no está confinado al pasado. Todo adelanto científico es por necesidad incompleto y parcialmente inexacto, pues el descubridor lo ve con las anteojeras que se usan en el momento y sólo puede deshacerse de una parte de dicho obstáculo.

## 1.3 Ciencia, arte y religión

El arte trata sobre la belleza cósmica. La ciencia tiene que ver con el orden cósmico. La religión se ocupa del propósito cósmico.

La búsqueda de orden y significado en el mundo circundante ha asumido diferentes formas: una es la ciencia, otra es el arte y otra es la religión. Aunque las raíces de las tres se remontan a miles de años atrás, las tradiciones de la ciencia son relativamente recientes. Lo más importante es que los dominios de la ciencia, el arte y la religión son diferentes, aunque con frecuencia se traslapan. La ciencia tiene que ver, principalmente, con el descubrimiento y el registro de fenómenos naturales, las artes se ocupan de la interpretación personal y la expresión creativa, y la religión aborda la fuente, el propósito y el significado de todo ello.

La ciencia y las artes son similares. En el arte de la literatura uno descubre lo que es posible en la experiencia humana. Uno puede aprender sobre las emociones, desde la ira hasta el amor, incluso si no se han experimentado. Las artes no necesariamente brindan dichas experiencias, pero las describen y sugieren qué puede ser posible para uno. La ciencia dice lo que es posible en la naturaleza. El conocimiento científico ayuda a predecir posibilidades en la naturaleza incluso antes de que dichas posibilidades se hayan experimentado. Ofrece una forma de conectar las cosas, de ver las relaciones entre ellas y de dar sentido a la gran variedad de eventos naturales a tu alrededor. La ciencia amplía la perspectiva de la naturaleza. Un conocimiento tanto de las artes como de las ciencias genera una totalidad que repercute en la manera de ver el mundo y las decisiones que se toman acerca del mundo y de uno mismo. Una persona verdaderamente culta tiene conocimientos tanto del arte como de las ciencias.

La ciencia y la religión también tienen similitudes, pero en esencia son diferentes, principalmente debido a que sus dominios son distintos. El dominio de la ciencia es el orden natural; el dominio de la religión es el propósito de la naturaleza. Las creencias y prácticas religiosas, por lo general, implican la fe en un ser supremo, y su adoración, además de la creación de la comunidad humana, no las prácticas de la ciencia. En este aspecto, ciencia y religión son tan diferentes como manzanas y naranjas: son dos campos diferentes de la actividad humana, aunque complementarios.

Cuando se estudie la naturaleza de la luz más adelante en este libro, primero se tratará la luz como una onda y luego como una partícula. Para la persona que sepa un poco de ciencia, las ondas y las partículas son conceptos contradictorios; la luz sólo puede ser una u otra, y uno tiene que elegir entre ellas. Pero para la persona culta, ondas y partículas se complementan mutuamente y ofrecen una comprensión más profunda de la luz. En forma similar, son principalmente las personas que no están informadas, o que están mal informadas, sobre la naturaleza más profunda tanto de la ciencia como de la religión, quienes creen que deben elegir entre creer en la religión o creer en la ciencia. A menos que uno tenga una comprensión superficial de una de ellas o de ambas, no existe una contradicción en ser religioso y ser científico en el pensamiento propio.[5]

La convicción de que sólo hay una verdad, y de que uno está en posesión de dicha verdad, me parece la raíz más profunda de toda la maldad que hay en el mundo.–*Max Born*

Muchas personas se preocupan por no conocer las respuestas a preguntas religiosas y filosóficas. Para evitar la incertidumbre, algunas aceptan sin reservas casi cualquier respuesta cómoda. Sin embargo, un mensaje importante en la ciencia es que la incertidumbre es aceptable. Por ejemplo, en el Capítulo 31 aprenderás que no es posible

[5]Desde luego, esto no se aplica a los extremistas religiosos que con tenacidad afirman que uno no puede abrazar su tipo de religión y la ciencia al mismo tiempo.

## PSEUDOCIENCIA

En épocas pre-científicas, cualquier intento por aprovechar la naturaleza significaba forzar a la naturaleza contra ella misma. La naturaleza tenía que subyugarse, por lo general con alguna forma de magia o por medios que estuvieran por arriba de la naturaleza, es decir, sobrenaturales. La ciencia hace exactamente lo contrario y trabaja dentro de las leyes de la naturaleza. Los métodos de la ciencia han desplazado en gran medida la dependencia en lo sobrenatural, más no por completo. Las antiguas formas persisten, con plena fuerza en las llamadas culturas primitivas, y también sobreviven en las culturas tecnológicamente avanzadas, en ocasiones disfrazadas como ciencia. Esto es ciencia falsa: **pseudociencia**. La marca distintiva de la pseudociencia es que carece de los ingredientes esenciales de la evidencia y no tiene una prueba para saber qué es incorrecto. En el reino de la pseudociencia, el escepticismo y las pruebas de la posible incorrección se minimizan o ignoran por completo.

Hay muchas formas de ver las relaciones causa y efecto en el universo. El misticismo es una de ellas, apropiada acaso en la religión más no aplicable a la ciencia. La astrología es un antiguo sistema de creencias que supone una correspondencia mística entre los individuos y el universo como totalidad: que los asuntos humanos están influidos por las posiciones y los movimientos de los planetas y otros cuerpos celestes. Esta visión no científica puede ser muy atractiva. Por muy insignificante que pueda uno sentirse a veces, los astrólogos aseguran que uno está íntimamente conectado con el funcionamiento del cosmos, que fue creado para los seres humanos, en particular para aquellos que pertenecen a la propia tribu, comunidad o grupo religioso. La astrología como magia antigua es una cosa, pero la astrología disfrazada de ciencia es otra. Cuando se coloca como ciencia relacionada con la astronomía, entonces se convierte en pseudociencia. Algunos astrólogos presentan sus artes con un disfraz científico. Cuando usan información astronómica actualizada y computadoras que elaboran la gráfica de los movimientos de los cuerpos celestes, los astrólogos actúan en el reino de la ciencia. Pero cuando usan dichos datos para elucubrar revelaciones astrológicas, cruzan hacia la pseudociencia hecha y derecha.

La pseudociencia, al igual que la ciencia, hace predicciones. Las predicciones de un zahorí, que localiza agua subterránea con una varita de radiestesia, tienen una tasa de éxito muy alta, casi de 100%. Siempre que un zahorí realiza su ritual y apunta hacia un punto en el suelo, el que excava el pozo está seguro de encontrar agua. La radiestesia funciona. Desde luego, el zahorí difícilmente puede errar, porque hay agua subterránea dentro de los 100 metros bajo la superficie en casi todo punto sobre la Tierra. (¡La verdadera prueba de un zahorí sería encontrar un lugar donde no hubiera agua!)

Un chamán que estudia las oscilaciones de un péndulo suspendido sobre el abdomen de una mujer embarazada puede predecir el sexo del feto con una exactitud de 50%. Esto significa que, si prueba su magia muchas veces en muchos fetos, la mitad de sus predicciones serán correctas y la otra mitad serán incorrectas, lo que corresponde a la previsibilidad de una adivinanza cualquiera. En comparación, determinar por medios científicos el sexo de los bebés que aún no nacen arroja una tasa de éxito de 95% si se utilizan sonogramas, y de 100% con amniocentesis. Lo mejor que se puede decir del chamán es que su tasa de éxito de 50% es mucho mejor que la de los astrólogos, lectores de manos u otros pseudocientíficos que predicen el futuro.

Un ejemplo de pseudociencia que tiene cero éxito lo constituyen las máquinas multiplicadoras de energía. Dichas máquinas, que se alega suministran más energía de la que toman, están, según se dice, "todavía en las mesas de diseño y necesitan fondos para su desarrollo". Las ofrecen charlatanes que venden acciones a un público ignorante que sucumbe a los castillos en el aire y a las promesas de éxito. Ésta es ciencia basura. Los pseudocientíficos están en todas partes, por lo general, son muy buenos en reclutar aprendices para obtener dinero o mano de obra, y pueden ser muy convincentes incluso para personas aparentemente razonables. Sus libros sobrepasan enormemente en número a los libros de ciencia en las librerías. La ciencia basura prolifera.

Hace cuatro siglos, la mayoría de los seres humanos estaban dominados por la superstición, diablos, demonios, enfermedades y magia en sus breves y difíciles vidas. La vida era cruel en la época medieval. Sólo gracias a un enorme esfuerzo, los seres humanos consiguieron el conocimiento científico, desterraron la superstición y se libraron de la ignorancia. La humanidad debe regocijarse de lo que ha aprendido: ya no se tiene que morir siempre que una enfermedad infecciosa aparezca ni vivir con temor a los demonios. En la actualidad, no es necesario afirmar que la superstición no es otra cosa que simple superstición, o que las nociones basura no son más que nociones basura, ya sea que las proclamen charlatanes en las esquinas de las calles, pensadores inexactos que escriben libros de salud con grandes promesas, mercachifles que venden terapia magnética o demagogos que infligen temor.

Sin embargo, es causa de alarma el que las supersticiones, que en alguna ocasión la gente luchó por erradicar, regresen con fuerza y encanten a un creciente número de personas. Ahora hay muchos miles de practicantes de astrología en Estados Unidos que atienden a millones de seguidores crédulos. Un mayor porcentaje de estadounidenses cree hoy en la astrología y los fenómenos ocultos que los ciudadanos de la Europa medieval. Pocos periódicos imprimen una columna diaria de ciencia, pero casi todos publican horóscopos diarios. Si bien los productos y los medicamentos han mejorado con los adelantos científicos, no ha sucedido lo mismo con el pensamiento humano.

Muchos creen que la condición humana se desliza en reversa debido a la tecnología creciente. Sin embargo, es más probable que la humanidad se deslice hacia atrás porque la ciencia y la tecnología se sometan a la irracionalidad, las supersticiones y la demagogia del pasado. A la irracionalidad se asignará "igual tiempo" en los salones de clase. Cuidado con los voceros de la irracionalidad. La pseudociencia y la irracionalidad son negocios inmensos y lucrativos.

conocer con certeza ni la cantidad de movimiento ni la posición de un electrón en un átomo. Cuanto más sabes de uno, menos puedes saber del otro. La incertidumbre es una parte del proceso científico. Está bien no conocer las respuestas a preguntas fundamentales. ¿Por qué las manzanas son atraídas gravitacionalmente a la Tierra?

¿Por qué los electrones se repelen mutuamente? ¿Por qué los imanes interactúan con otros imanes? ¿Por qué la energía tiene masa? En el nivel más profundo, los científicos no conocen las respuestas a dichas preguntas... al menos no todavía. Se sabe mucho acerca de dónde estamos, pero realmente nada acerca de *por qué* estamos. Está bien no conocer las respuestas a tales preguntas religiosas. Ante la opción de una mente cerrada con respuestas cómodas y una mente abierta y exploradora sin respuestas, la mayoría de los científicos elige la última. Los científicos en general están cómodos con no saber.

## 1.4 Ciencia y tecnología

Ciencia y tecnología también son diferentes entre sí. A la ciencia le interesa recopilar conocimiento y organizarlo. La tecnología es ciencia aplicada, que utilizan los tecnólogos e ingenieros para propósitos prácticos. También ofrece las herramientas que necesitan los científicos en sus exploraciones ulteriores.

La tecnología es un arma de doble filo que puede ser tanto útil como dañina. Se tiene la tecnología, por ejemplo, para extraer combustibles fósiles del suelo y luego quemar los combustibles fósiles para producir energía. La producción de energía con combustibles fósiles ha beneficiado a la sociedad de innumerables maneras. Por el otro lado, la quema de combustibles fósiles pone en peligro al ambiente. Es tentador culpar a la propia tecnología de problemas como la contaminación, el agotamiento de recursos e incluso la sobrepoblación. Sin embargo, dichos problemas no son culpa de la tecnología, más

### VALORACIÓN DEL RIESGO

Los numerosos beneficios de la tecnología se acompañan de riesgos. Cuando se ve que los beneficios de una innovación tecnológica sobrepasan sus riesgos, la tecnología se acepta y se aplica. Los rayos X, por ejemplo, siguen usándose para diagnósticos médicos a pesar de su potencial para causar cáncer. Pero cuando se percibe que los riesgos de una tecnología superan sus beneficios, ésta debe usarse muy pocas veces o nunca.

El riesgo puede variar con los diferentes grupos. La aspirina (ácido acetilsalicílico) es útil para los adultos, pero en los niños pequeños puede causar una enfermedad potencialmente mortal conocida como *síndrome de Reye.* Desechar aguas negras en los ríos locales puede plantear poco riesgo para una ciudad ubicada río arriba, pero para los poblados ubicados río abajo las aguas negras no tratadas son un riesgo de salud. De igual modo, almacenar desechos radiactivos en el subsuelo puede plantear poco riesgo para el mundo actual, pero para las generaciones futuras el riesgo de tal almacenamiento es mayor si hay fugas hacia las aguas subterráneas. Las tecnologías que involucran diferentes riesgos para distintas personas, así como diferentes beneficios, plantean preguntas que con frecuencia son motivo de debates acalorados. ¿Cuáles medicamentos deben venderse al público general sin receta médica y cómo deben etiquetarse? ¿Deben irradiarse los alimentos con la finalidad de acabar con la intoxicación por alimentos, lo cual mata a más de 5,000 estadounidenses cada año? Cuando se deciden políticas públicas, deben considerarse los riesgos para todos los integrantes de la sociedad.

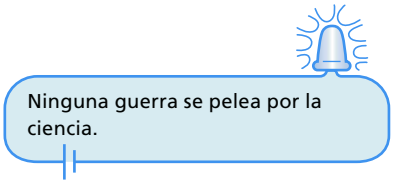
Los riesgos de la tecnología no siempre son evidentes de forma inmediata. Nadie percibió por completo los peligros de los productos de combustión cuando los combustibles fósiles impulsaron por primera vez el progreso industrial. En la actualidad, es crucial conocer los riesgos de la tecnología tanto a corto como a largo plazos.

Las personas parecen tener dificultades para aceptar que es imposible que exista el riesgo cero. Los aviones no pueden hacerse perfectamente seguros. Los alimentos procesados no pueden producirse sin toxicidad alguna, pues todos los alimentos son tóxicos en cierto grado. Tú no puedes evitar la radiactividad, porque está en el aire que respiras y los alimentos que ingieres, y ha sido así desde antes de que los seres humanos caminaran por primera vez sobre la Tierra. Incluso la lluvia más limpia contiene carbono 14 radiactivo, por no mencionar el mismo en el cuerpo. Entre cada latido cardiaco en cada cuerpo humano, siempre hay alrededor de 10,000 decaimientos radiactivos que ocurren de manera natural. Uno podrá esconderse en las colinas, comer los alimentos más naturales, practicar higiene obsesiva y aun así morir de cáncer causado por la radiactividad que emana del propio cuerpo. La probabilidad de morir algún día es de 100%. Nadie está exento.

La ciencia ayuda a determinar lo más probable. A medida que mejoran las herramientas de la ciencia, la valoración de lo más probable se acerca más a dar en el blanco. La aceptación del riesgo, por otra parte, es un tema social. Hacer del riesgo cero una meta social consumiría los recursos económicos presentes y futuros. ¿No sería más noble aceptar un riesgo que no fuera cero y reducir al mínimo el riesgo dentro de los límites de la viabilidad? Una sociedad que no acepta riesgos no recibe beneficios.

que la lesión de una arma es culpa del arma. Son los seres humanos quienes utilizan la tecnología, quienes son responsables de cómo se usa.

Vale la pena remarcar que ya se cuenta con la tecnología para resolver muchos problemas ambientales. Este siglo XXI está siendo testigo del cambio de los combustibles fósiles a fuentes de energía más sustentables, como la fotovoltaica, la generación de electricidad térmica solar y la conversión de biomasa. Mientras que el papel donde se imprime este libro proviene de los árboles, el papel pronto provendrá de hierbas de rápido crecimiento, y cada vez se necesitará menos conforme las pantallas electrónicas ganen popularidad. Cada vez se reciclan más productos de desecho. En algunas partes del mundo se han logrado avances en el control de la explosión demográfica que agrava casi todos los problemas que enfrentan los seres humanos en la actualidad. La humanidad vive en un planeta finito y cada vez más personas reconocen la capacidad de soporte de población de la Tierra. El mayor obstáculo para resolver los problemas de hoy se encuentra más en la inercia social que en la falta de tecnología. La tecnología es la herramienta. Lo que se haga con esta herramienta es responsabilidad de cada uno. La promesa de la tecnología es un mundo más limpio y sano. Las aplicaciones sabias de la tecnología *pueden* conducir a un mundo mejor.

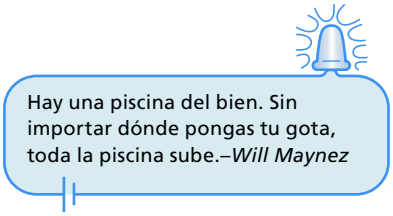



## 1.5 Física: la ciencia básica

La ciencia, que alguna vez fue llamada *filosofía natural,* abarca el estudio de las cosas vivas y de las no vivas, las ciencias de la vida y las ciencias físicas. Las ciencias de la vida incluyen biología, zoología y botánica. Las ciencias físicas incluyen geología, astronomía, química y física.

La física es más que una parte de las ciencias físicas. Es la ciencia *básica*. Tiene que ver con la naturaleza de las cosas básicas como movimiento, fuerzas, energía, materia, calor, sonido, luz y la estructura de los átomos. La química trata de cómo se junta la

**FIGURA 1.9**
El "bote salvavidas" del planeta Tierra: una hermosa mezcla de ciencia y tecnología.




materia, cómo los átomos se combinan para formar moléculas y cómo las moléculas se combinan para construir los diversos tipos de materia del entorno. La biología es más compleja e involucra materia que está viva. De modo que, debajo de la biología, está la química, y debajo de la química, está la física. Los conceptos de la física llegan a esas ciencias más complicadas. Es por eso por lo que la física es la ciencia más básica.

La comprensión de la ciencia comienza con la comprensión de la física. Los siguientes capítulos presentan la física conceptualmente, de modo que puedas disfrutar su comprensión.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Cuál de las siguientes actividades involucra la expresión más humana de pasión, talento e inteligencia?**

**a. Pintura y escultura**
**b. Literatura**
**c. Música**
**d. Religión**
**e. Ciencia**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

¡Todas ellas! Sin embargo, el valor humano de la ciencia es el menos comprendido por la mayoría de los individuos de la sociedad. Las razones son diversas, y van desde la noción común de que la ciencia es incomprensible para las personas de habilidad promedio, hasta la opinión extrema de que la ciencia es una fuerza deshumanizadora en la sociedad. Es probable que la mayor parte de las malas interpretaciones acerca de la ciencia surjan de la confusión entre los *abusos* de la ciencia y la ciencia en sí.

La ciencia es una actividad humana encantadora compartida por una gran variedad de personas que, con las herramientas y el conocimiento actuales, llegan más lejos y descubren más de ellos mismos y de sus ambientes que las personas en el pasado pudieron haber logrado alguna vez. Mientras más sepas de ciencia, más apasionado te sentirás por tus alrededores. ¡Hay física en todo lo que ves, escuchas, hueles, saboreas y tocas!

## 1.6 En perspectiva

Hace apenas algunos siglos, los artistas, arquitectos y artesanos más talentosos y habilidosos del mundo dirigían su genio y esfuerzo a la construcción de las grandes catedrales, sinagogas, templos y mezquitas. Algunas de esas estructuras arquitectónicas tardaron siglos en construirse, lo que significa que nadie fue testigo del comienzo y del final de la construcción. Incluso los arquitectos y primeros constructores que vivieron hasta una edad madura nunca vieron los resultados terminados de su labor. Vidas enteras se consumieron en las sombras de la construcción que debió parecer sin principio ni fin. Esta enorme concentración de energía humana fue inspirada por una visión que rebasaba las preocupaciones mundanas: una visión del cosmos. Para las personas de esa época, las estructuras que erigían eran sus "naves espaciales de fe", firmemente ancladas pero apuntando al cosmos.

En la actualidad, los esfuerzos de muchos de los más habilidosos científicos, artistas, ingenieros y técnicos se dirigen a construir las naves espaciales que ya orbitan la Tierra y otras que viajarán más allá. El tiempo necesario para construir dichas naves espaciales es extremadamente breve en comparación con el tiempo empleado en construir las estructuras de piedra y mármol del pasado. Muchas personas que trabajan en las naves espaciales de hoy ya habían nacido antes de que el primer avión transportara pasajeros. ¿A dónde se dirigirán vidas más jóvenes en un tiempo similar?

La humanidad parece estar ante el amanecer de un gran cambio en el crecimiento humano pues, como sugiere el pequeño Evan en la fotografía que precede el comienzo de este capítulo, es posible que sea como el pollito que sale del cascarón cuando se agotan los recursos de su ambiente dentro del huevo y está a punto de salir a una nueva variedad de posibilidades. La Tierra es la cuna de la humanidad y le ha funcionado bien. Pero las cunas, por muy cómodas que sean, quedan pequeñas algún día. De modo que, con la inspiración que en muchas formas es similar a la inspiración de quienes construyeron las primeras catedrales, sinagogas, templos y mezquitas, la humanidad se dirige al cosmos.

¡Vives en una época emocionante!

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Método científico.** Principios y procedimientos para la búsqueda sistemática de conocimiento que involucra el reconocimiento y la formulación de un problema, la recopilación de datos mediante observación y experimentos, y la formulación y puesta a prueba de hipótesis.

**Hipótesis.** Conjetura informada; explicación razonable de una observación o resultado experimental que no es completamente aceptado como factual hasta que se pone a prueba una y otra vez con experimentos.

**Actitud científica.** Método científico inclinado hacia el análisis, la integridad y la humildad.

**Hecho.** Enunciado acerca del mundo en el que coinciden observadores competentes que han realizado una serie de observaciones.

**Ley.** Hipótesis o enunciado general acerca de la relación de cantidades naturales que se ha puesto a prueba una y otra vez y no se ha contradicho. También conocida como *principio.*

**Teoría.** Síntesis de un gran cuerpo de información que abarca hipótesis bien probadas y verificadas acerca de ciertos aspectos del mundo natural.

**Pseudociencia.** Ciencia falsa que pretende ser ciencia real.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 1.1 Mediciones científicas

1. Brevemente, ¿qué es ciencia?
2. A lo largo de las épocas, ¿cuál ha sido la reacción general ante las nuevas ideas acerca de las "verdades" establecidas?
3. Cuando el Sol estaba directamente arriba en Cirene, ¿por qué no estaba directamente arriba en Alejandría?
4. La Tierra, como todo lo demás que es iluminado por el Sol, proyecta una sombra. ¿Por qué esta sombra forma un cono?
5. ¿Cómo se compara el diámetro de la Luna con la distancia entre la Tierra y la Luna?
6. ¿Cómo se compara el diámetro del Sol con la distancia entre la Tierra y el Sol?
7. ¿Por qué Aristarco eligió el momento de la media Luna para hacer sus mediciones y calcular la distancia Tierra-Sol?
8. ¿Qué son las manchas circulares de luz que se ven en el piso abajo de un árbol en un día soleado?
9. ¿Cuál es la importancia de las ecuaciones en este libro?

### 1.2 Métodos científicos

10. Destaca algunas características del método científico.
11. Distingue entre un hecho científico, una hipótesis, una ley y una teoría.
12. En la vida diaria, con frecuencia se alaba a las personas por mantener algún punto de vista particular, por el "valor de sus convicciones". Un cambio de opinión se ve como señal de debilidad. ¿Cómo es que esto es diferente en ciencia?
13. ¿Cuál es la prueba para saber si una hipótesis es o no científica?
14. En la vida diaria se observan muchos casos de personas que son sorprendidas distorsionando las cosas y poco después son perdonadas y aceptadas por sus contemporáneos. ¿Cómo es esto diferente en la ciencia?
15. ¿Qué prueba puedes realizar para aumentar la posibilidad, en tu propia mente, de estar en lo correcto respecto de una idea particular?

### 1.3 Ciencia, arte y religión

16. ¿Por qué a los estudiantes de artes se les recomienda aprender de ciencia y a los estudiantes de ciencia se les recomienda aprender de las artes?
17. ¿Las personas deben elegir entre ciencia y religión?
18. La comodidad psicológica es un beneficio de tener respuestas sólidas a preguntas religiosas. ¿Qué beneficio acompaña a la postura de no conocer las respuestas?

### 1.4 Ciencia y tecnología

19. Distingue con claridad entre ciencia y tecnología.

### 1.5 Física: la ciencia básica

20. ¿Por qué a la física se le considera la ciencia básica?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

21. Perfora un orificio en una hoja de cartulina y sostén la cartulina horizontalmente en la luz solar (como en la Figura 1.6). Observa la imagen del Sol que se proyecta abajo. Para convencerte de que la mancha redonda de luz es una imagen del Sol redondo, intenta usar orificios de diferentes formas. Un orificio cuadrado o triangular también proyectará una imagen redonda cuando la distancia a la imagen sea grande comparada con el tamaño del orificio. Cuando los rayos del Sol y la superficie de la imagen son perpendiculares, la imagen es un círculo; cuando los rayos del Sol forman un ángulo con la superficie de la imagen, la imagen es un círculo "alargado", una elipse. Deja que la imagen solar caiga sobre una moneda. Coloca la cartulina de modo que la imagen apenas cubra la moneda. Ésta es una forma conveniente de medir el diámetro de la imagen: el mismo que el diámetro de la moneda fácil de medir. Luego mide la distancia entre la cartulina y la moneda. Tu proporción entre el tamaño de la imagen y la distancia de la imagen debe ser aproximadamente 1/110. Ésta también es la razón del diámetro del Sol a su distancia respecto de la Tierra. Con la información de que el Sol está a 150,000,000 kilómetros de la Tierra, calcula el diámetro del Sol. (Preguntas interesantes: ¿cuántas monedas colocadas extremo con extremo cabrían entre la imagen solar y la cartulina? ¿Cuántos soles cabrían entre la cartulina y el Sol?)
22. Elije un día particular en el futuro muy cercano, y durante ese día lleva contigo una pequeña libreta y registra cada vez que entras en contacto con tecnología moderna. Después escribe una página o dos donde analices qué tanto dependes de las tecnologías de tu lista. Toma nota de cómo serías afectado si súbitamente desaparecieran cada una y cómo lidiarías con la pérdida.

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

23. ¿Cuál es el castigo del fraude científico en la comunidad científica?
24. ¿Cuáles de las siguientes son hipótesis científicas? (a) La clorofila hace verde al pasto. (b) La Tierra gira en torno a su eje porque las cosas vivientes necesitan alternancia de luz y oscuridad. (c) Las mareas son provocadas por la Luna.
25. Para responder a la pregunta de "cuando una planta crece, ¿de dónde proviene el material?", Aristóteles planteó por lógica la hipótesis de que todo el material provenía del suelo. ¿Consideras que su hipótesis es correcta, incorrecta o parcialmente correcta? ¿Qué experimentos propones para apoyar tu elección?
26. Cuando caminas de la sombra a la luz solar, el calor del Sol es tan evidente como el calor de los carbones calientes de una hoguera en una habitación que de otro modo estaría fría. Sientes el calor del Sol no debido a su alta temperatura (en algunos sopletes de soldador pueden encontrarse temperaturas más altas), sino porque el Sol es grande. ¿Cuál estimas es más grande: el radio del Sol o la distancia entre la Luna y la Tierra? Comprueba tu respuesta en la lista de datos físicos en las guardas de este libro. ¿Te sorprende tu respuesta?
27. ¿Qué es lo que probablemente entiende mal una persona que dice, "pero esa sólo es una teoría científica"?
28. Se observa que la sombra proyectada por un pilar vertical en Alejandría al mediodía durante el solsticio de verano es 1/8 la altura del pilar. La distancia entre Alejandría y Cirene es 1/8 el radio de la Tierra. ¿Existe una conexión geométrica entre estas dos razones 1 a 8?
29. Si la Tierra fuera más pequeña de lo que es, pero la distancia de Alejandría a Cirene fuera la misma, ¿la sombra del pilar vertical en Alejandría sería más larga o más corta al mediodía durante el solsticio de verano?

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

30. El gran filósofo y matemático Bertrand Russell (1872-1970) escribió sobre ideas en la primera parte de su vida que rechazó en la última parte de su vida. Discute con tus compañeros si ves en esto un signo de debilidad o un signo de fortaleza en Bertrand Russell. (¿Supones que tus ideas actuales acerca del mundo que te rodea cambiarán a medida que aprendas y experimentes más, o supones que mayor conocimiento y experiencia solidificarán tu comprensión actual?)
31. Bertrand Russell escribió: "creo que debemos conservar la creencia de que el conocimiento científico es una de las glorias de la humanidad. No sostendré que dicho conocimiento nunca puede causar daño. Considero que tales proposiciones generales casi siempre pueden refutarse con ejemplos bien elegidos. Lo que sí sostendré, y sostendré vigorosamente, es que el conocimiento con mayor frecuencia es más útil que dañino y que el temor al conocimiento es con mayor frecuencia más dañino que útil". Discute con tus amigos ejemplos que respalden esta afirmación.
32. Tu joven familiar favorito se pregunta si debe integrarse a un grupo cada vez más grande de la comunidad, principalmente para hacer nuevos amigos. Él busca tu consejo. Antes de responder, te enteras de que el carismático líder del grupo dice a sus seguidores: "muy bien, así es como operamos: primero, NUNCA deben cuestionar nada de lo que yo les diga. En segundo lugar, NUNCA deben cuestionar lo que lean en nuestras publicaciones". ¿Qué le aconsejarías?

PARTE UNO

# Mecánica

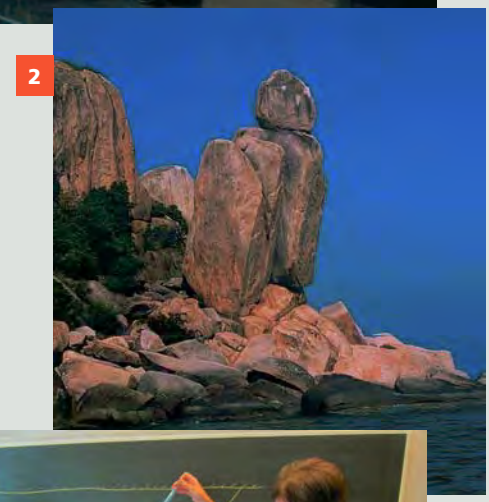
¡Intrigante! El número de bolas que se sueltan en el conjunto de bolas siempre es el mismo número que surge del otro lado. Pero, ¿por qué? Debe haber una razón, reglas mecánicas de algún tipo. Sabré por qué las bolas se comportan de manera tan predecible después de aprender las reglas de la mecánica en los siguientes capítulos. Pero, lo mejor de todo es que, ¡aprender estas reglas me permitirá tener una intuición más aguda para comprender el mundo que me rodea!

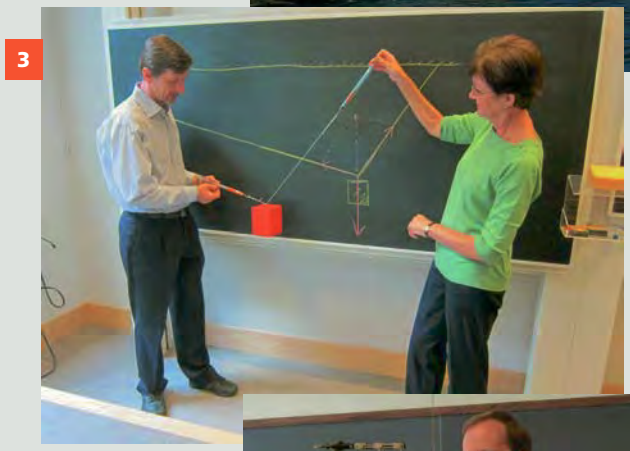
2

CAPÍTULO 2

# Primera ley de Newton de movimiento: inercia


2.1 Aristóteles en movimiento
2.2 Los experimentos de Galileo
2.3 Primera ley de Newton de movimiento
2.4 Fuerza neta y vectores
2.5 La regla del equilibrio
2.6 Fuerza de sostén
2.7 Equilibrio de cosas en movimiento
2.8 La Tierra en movimiento





1 Will Maynez muestra que la inercia del yunque sobre el pecho del autor es suficiente para protegerlo contra el golpe del martillo. 2 La roca en equilibrio ilustra de un modo sorprendente la inercia. 3 Cedric y Ann Linder comparan las diferentes tensiones de la cuerda que sostiene el cubo rojo. 4 Karl Westerberg pregunta a sus alumnos cuál cuerda, la inferior o la superior, se romperá cuando súbitamente jale hacia abajo la cuerda inferior.

No todos los instructores de física sienten afecto por la *Física conceptual*. Algunos sin duda prefieren adoptar una postura práctica de "arremangarse la camisa" y meterse de inmediato en la resolución de problemas, sin dedicar tiempo a la comprensión de conceptos. En 1992 me sentí halagado de ver un artículo en la revista *The Physics Teacher* escrito por un profesor de Sudáfrica quien informaba haber tenido gran éxito con la enseñanza de la física de manera conceptual. Entré en contacto con él y hemos sido amigos desde entonces. Hablo de Cedric Linder, quien creció y obtuvo la mayor parte de su educación en física en Sudáfrica, continuó su educación científica en Rutgers, en Nueva Jersey, y luego acudió a la University of British Columbia, donde obtuvo su doctorado en 1989.

Como resultado del artículo de Cedric, en el que enaltecía la forma conceptual de enseñanza, y su investigación en el campo de la enseñanza de la física, lo buscaron educadores de la Uppsala University, en Suecia. Aceptó un empleo para establecer una División de Investigación de la Enseñanza de la Física en el Departamento de Física y Astronomía en dicha universidad. Cedric y su esposa Anne consideran ahora a Uppsala su hogar, donde Anne trabaja como investigadora y administradora de su grupo.

Los Linder llevan educadores de todo el mundo a sus seminarios y talleres, con actividades de física muy estimulantes. Algunos profesores de física tienen la habilidad de hacer de la física una experiencia fascinante. Qué bueno que Cedric forma parte de este grupo... y que lo expande.

## 2.1 Aristóteles en movimiento

Aristóteles dividió el movimiento en dos clases principales: *movimiento natural* y *movimiento violento.* Se considerará de manera breve cada uno de ellos, no como material de estudio, sino como un antecedente de las ideas actuales acerca del movimiento.

Aristóteles afirmó que el movimiento natural procedía de la "naturaleza" de un objeto, y dependía de la combinación de los cuatro elementos (tierra, agua, aire y fuego) que contenía el objeto. En su opinión, todo objeto del Universo tiene un lugar propio, determinado por su "naturaleza"; cualquier objeto que no esté en su lugar propio "luchará" por llegar ahí. Al ser de la tierra, un pedazo de arcilla sin nada que la sostenga caerá al suelo; al ser del aire, un soplo de humo sin contener se elevará; al ser una mezcla de tierra y aire, pero predominantemente tierra, una pluma caerá al suelo, mas no tan rápidamente como un trozo de arcilla. Aristóteles afirmó que los objetos más pesados lucharían más duro y argumentó que los objetos deben caer con rapideces proporcionales a sus pesos: cuanto más pesado sea el objeto, más rápido debe caer.

El movimiento natural podría ser o recto hacia arriba o recto hacia abajo, como en el caso de todas las cosas sobre la Tierra, o podría ser circular, como en el caso de los objetos celestes. A diferencia del movimiento ascendente y descendente, el movimiento circular no tiene principio o fin, y se repite sin desviarse. Aristóteles creía que a los cielos les correspondían reglas diferentes y afirmó que los cuerpos celestes son esferas perfectas hechas de una sustancia perfecta e invariable, que él llamó *quintaesencia*.[1] (El único objeto celeste con alguna variación detectable sobre su cara era la Luna. Los cristianos medievales, todavía bajo el dominio de las enseñanzas de Aristóteles, explicaban con ignorancia que las imperfecciones lunares se debían a la cercanía de la Luna y la contaminación por la corrupción humana sobre la Tierra.)

El movimiento violento, la otra clase de movimiento de Aristóteles, resultaba de fuerzas de empuje o tirón. El movimiento violento era un movimiento impuesto. Una persona que empuja un carro o levanta un peso impone movimiento, como lo hace alguien que lanza una piedra o gana una competencia de tirar de la cuerda. El viento impone movimiento a los barcos. Las corrientes de agua imponen movimiento a las rocas y a los troncos de los árboles. Lo esencial acerca del movimiento violento era que tenía causa externa y se impartía a los objetos; no se movían por sí solos, ni por su "naturaleza", sino por empujones o tirones.

El concepto de movimiento violento tenía sus dificultades, pues los empujones y tirones que lo propiciaban no siempre eran evidentes. Por ejemplo, la cuerda del arco

[1]Quintaesencia es la *quinta* esencia; las otras cuatro son: tierra, agua, aire y fuego.

movía la flecha hasta que la flecha abandonaba el arco; después de ello, parecía necesario otro factor que la empujara para seguir explicando el movimiento de la flecha. Por tanto, Aristóteles imaginó que la flecha separaba el aire y éste, en consecuencia, regresaba nuevamente para evitar la formación de vacío. Al momento de regresar, el aire apretaba la parte trasera de la flecha. Así, ésta era impulsada a través del aire como una barra de jabón que se impulsa en la bañera cuando aprietas uno de sus extremos.

En resumen, Aristóteles enseñaba que todos los movimientos se debían a la naturaleza del objeto en movimiento, o a un empuje o tirón sostenido. Siempre que un objeto esté en su lugar propio, no se moverá a menos que se someta a una fuerza. Excepto por los objetos celestes, el estado normal es de reposo.

Los postulados de Aristóteles acerca del movimiento fueron un comienzo del pensamiento científico y, aunque él no los consideró como la última palabra sobre la materia, sus seguidores durante casi 2,000 años consideraron sus ideas como incuestionables. La noción de que el estado normal de los objetos es el reposo, estuvo implícita en el pensamiento de los tiempos antiguos, la Edad Media y el inicio del Renacimiento. Dado que era evidente para la mayoría de los pensadores hasta el siglo XVI que la Tierra debía estar en su lugar propio, y dado que una fuerza capaz de mover la Tierra era inconcebible, parecía muy claro que la Tierra no se movía.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿No es de sentido común pensar que la Tierra está en su lugar propio y que una fuerza para moverla *es* inconcebible, como sostuvo Aristóteles, y que la Tierra está en reposo en este Universo?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Las ideas de Aristóteles eran lógicas y congruentes con las observaciones cotidianas. De modo que, a menos que te familiarices con la física que se presenta en breve en este libro, las ideas de Aristóteles sobre el movimiento sí *tienen* sentido común. Pero, a medida que adquieras nueva información sobre las reglas de la naturaleza, probablemente descubrirás que tu sentido común avanza y deja atrás el pensamiento aristotélico.

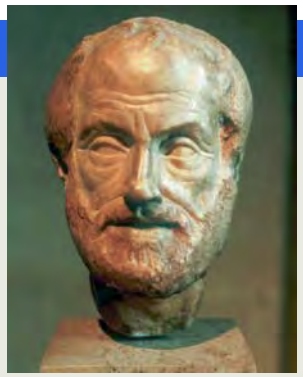
## Copérnico y la Tierra en movimiento

Nicolás Copérnico (1473-1543)

Fue en este clima intelectual donde el astrónomo polaco Nicolás Copérnico (1473-1543) formuló su teoría de la Tierra en movimiento. Copérnico razonó que la forma más sencilla de explicar los movimientos observados del Sol, la Luna y los planetas a través del cielo era suponer que la Tierra (y otros planetas) formaba círculos alrededor del Sol. Trabajó durante años sin hacer públicas sus ideas, por dos razones. La primera era que temía a la persecución; una teoría que difería tanto de la opinión pública con seguridad se tomaría como un ataque contra el orden establecido. La segunda razón era que él mismo tenía serias dudas al respecto; no podía reconciliar la idea de una Tierra en movimiento con las ideas prevalecientes de movimiento. Finalmente, en los últimos días de su vida, ante la exhortación de sus amigos cercanos, envió su *De Revolutionibus* al impresor. Recibió el primer ejemplar de su famosa exposición el día de su muerte, 24 de mayo de 1543.

La mayoría de las personas conoce la reacción de la Iglesia medieval ante la idea de que la Tierra se desplazara alrededor del Sol. Las ideas de Aristóteles se habían convertido tan formidablemente en parte de la doctrina católica, que contradecirlas era cuestionar a la mismísima Iglesia. Para muchos líderes eclesiásticos, la idea de una Tierra en movimiento amenazaba no sólo su autoridad, sino también los cimientos mismos de la fe y la civilización. Para bien o para mal, esta nueva idea habría de trastornar su concepción del cosmos, aunque con el tiempo la Iglesia la aceptó.

## ARISTÓTELES (384-322 A. C.)



Filósofo, científico y educador griego, Aristóteles fue hijo de un médico quien atendió personalmente al rey de Macedonia. A los 17 años de edad, Aristóteles entró a la Academia de Platón, donde trabajó y estudió durante 20 años, hasta la muerte de Platón. Entonces se convirtió en tutor del joven Alejandro Magno. Ocho años después formó su propia escuela. La meta de Aristóteles era sistematizar el conocimiento existente, tal como Euclides sistematizó la geometría. Aristóteles realizó observaciones cruciales, recolectó especímenes y reunió, resumió y clasificó casi todo el conocimiento existente del mundo físico. Su táctica sistemática se convirtió en el método del cual más tarde surgió la ciencia occidental. Luego de su muerte, sus voluminosos cuadernos se conservaron en cuevas cerca de su casa y después se vendieron a la biblioteca de Alejandría. La actividad académica cesó en la mayor parte de Europa durante la Edad Media, y las obras de Aristóteles se olvidaron y perdieron, excepto en los estudios que continuaron en los imperios bizantino e islámico. Varios textos se reintrodujeron en Europa durante los siglos XI y XII y se tradujeron al latín. La Iglesia, la fuerza política y cultural dominante en Europa Occidental, primero prohibió las obras de Aristóteles, pero luego las aceptó e incorporó en la doctrina cristiana.

# 2.2 Los experimentos de Galileo

## La torre inclinada

Fue Galileo, el más destacado científico de comienzos del siglo XVII, quien dio credibilidad a la concepción copernicana de una Tierra en movimiento. Galileo logró esto al desacreditar las ideas aristotélicas acerca del movimiento. Si bien no fue el primero en señalar las dificultades en las ideas de Aristóteles, Galileo fue el primero en proporcionar refutación concluyente mediante observación y experimentación.

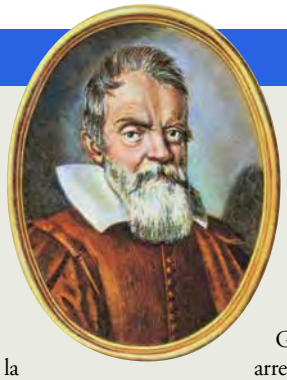
Galileo derribó con facilidad la hipótesis de los cuerpos que caen propuesta por Aristóteles. Se dice que Galileo soltó objetos de varios pesos desde lo alto de la torre inclinada de Pisa para comparar sus caídas. Contrario a la afirmación de Aristóteles, Galileo descubrió que una piedra el doble de pesada que otra no cae dos veces más rápido. Excepto por el pequeño efecto de la resistencia del aire, descubrió que los objetos de diversos pesos, cuando se sueltan al mismo tiempo, caen juntos y golpean el suelo al mismo tiempo. En una ocasión, se dice que Galileo atrajo a una gran multitud para que atestiguara la caída de dos objetos de diferente peso desde lo alto de la torre. La leyenda dice que muchos observadores de esta demostración, quienes vieron a los objetos golpear el suelo al mismo tiempo, se burlaron del joven Galileo y siguieron creyendo firmemente en las enseñanzas aristotélicas.

**FIGURA 2.1**
La famosa demostración de Galileo.

## Planos inclinados

A Galileo le interesaba *cómo* se mueven las cosas más que *por qué* se mueven. Demostró que la experimentación, más que la lógica, es la mejor prueba del conocimiento. Aristóteles fue un observador astuto de la naturaleza, y trabajó con problemas de su alrededor en lugar de estudiar casos abstractos que no ocurrían en su entorno. El movimiento siempre involucraba un medio de resistencia como el aire o el agua. Aristóteles creyó que un vacío era imposible y, por tanto, no le dio seria consideración al movimiento en ausencia de un medio de interacción. Por esta razón, para Aristóteles era básico que un objeto necesitara un empuje o un tirón para mantenerse en movimiento. Y fue este principio básico el que rechazó Galileo cuando afirmó que, si no hay nada que interfiera con un objeto en movimiento, éste seguirá moviéndose en línea recta por siempre, sin necesitar de un empujón, un jalón o alguna fuerza de algún tipo.

## GALILEO GALILEI (1564-1642)



Galileo nació en Pisa, Italia, el mismo año que nació Shakespeare y que murió Miguel Ángel. Estudió medicina en la Universidad de Pisa y luego cambió a matemáticas. Cultivó un temprano interés por el movimiento y pronto tuvo diferencias con sus contemporáneos, quienes sostenían las ideas aristotélicas de la caída de los cuerpos. Los experimentos de Galileo con los cuerpos que caen desacreditó la afirmación de Aristóteles de que la rapidez de un objeto que cae era proporcional a su peso, como se señaló antes. Pero, algo muy importante fue que, los hallazgos de Galileo también amenazaban la autoridad de la Iglesia, que sostenía que las enseñanzas de Aristóteles eran parte de la doctrina católica. Galileo procedió a informar sus observaciones telescópicas, con lo que se metió en más problemas con la Iglesia. Contó de sus observaciones de las lunas que orbitan al planeta Júpiter. Sin embargo, la Iglesia enseñaba que todo lo que estaba en los cielos giraba alrededor de la Tierra. Galileo también informó sobre las manchas oscuras del Sol, pero, de acuerdo con la doctrina eclesiástica, Dios había creado el Sol como una fuente perfecta de luz, sin defectos. Bajo presión, Galileo se retractó de sus descubrimientos y evitó el destino de Giordano Bruno, quien se mantuvo firme y siguió creyendo en el modelo copernicano del sistema solar y fue quemado en la hoguera en 1600. No obstante, Galileo fue sentenciado a arresto domiciliario perpetuo. Anteriormente, se había lesionado los ojos mientras investigaba el Sol en sus estudios telescópicos, lo que generó su ceguera a los 74 años de edad. Murió cuatro años después. Toda época tiene rebeldes intelectuales, algunos de los cuales amplían las fronteras del conocimiento. Entre ellos, ciertamente, está Galileo.

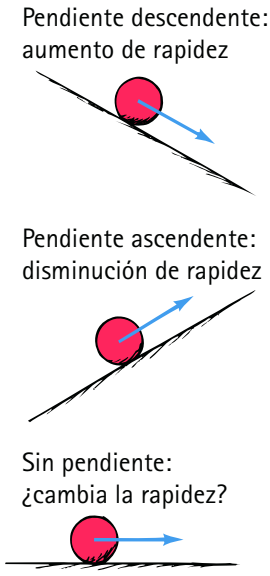



**FIGURA 2.2**
Movimiento de bolas sobre varios planos.

Para poner a prueba esta hipótesis, Galileo hizo experimentos con el movimiento de varios objetos sobre superficies planas inclinadas en varios ángulos. Observó que las bolas que rodaban sobre planos con pendiente descendente adquirían rapidez, en tanto que las bolas que rodaban sobre planos con pendiente ascendente perdían rapidez. Con base en esto, razonó que las bolas que rodaban a lo largo de un plano horizontal ni acelerarían ni frenarían. La bola finalmente llegaría al reposo no debido a su "naturaleza", sino debido a la fricción. Esta idea quedó respaldada con las observaciones de Galileo acerca del movimiento sobre superficies más lisas: cuando había menos fricción, el movimiento de los objetos persistía durante más tiempo; a menos fricción, más se acercaba el movimiento a una rapidez constante. Galileo razonó que, en ausencia de fricción u otras fuerzas que se opusieran, un objeto con movimiento horizontal continuaría moviéndose indefinidamente.

Esta afirmación fue apoyada por un experimento diferente y otra línea de razonamiento. Galileo colocó dos de sus planos inclinados uno frente al otro. Observó

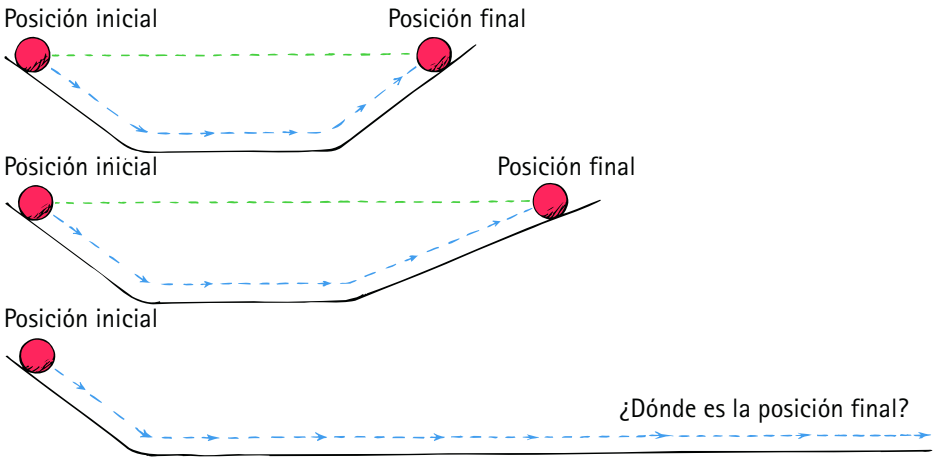



**FIGURA 2.3**
Una bola que rueda hacia abajo por un plano inclinado en el lado izquierdo tiende a rodar hacia arriba hasta su altura inicial en el derecho. La bola debe rodar una mayor distancia a medida que se reduce el ángulo de inclinación a la derecha.

que una bola que se suelta desde una posición de reposo en lo alto de un plano con pendiente descendente rodaba hacia abajo y luego subía por el plano con pendiente ascendente hasta que casi alcanzaba su altura inicial. Razonó que sólo la fricción impedía que se elevara hasta exactamente la misma altura, porque cuanto más lisos los planos, más se acercaba la bola a la misma altura. Luego redujo el ángulo del plano con pendiente ascendente. De nuevo la bola alcanzaba la misma altura, pero tenía que recorrer más distancia. Más reducciones del ángulo produjeron resultados similares: para llegar a la misma altura, la bola tenía que recorrer más distancia cada vez. Entonces planteó la pregunta: "si tengo un plano horizontal largo, ¿cuán lejos debe ir la bola para alcanzar la misma altura?". La respuesta obvia es, "al infinito: nunca alcanzará su altura inicial".[2]

Galileo analizó esto todavía en otra forma. Dado que el movimiento descendente de la bola desde el primer plano es el mismo para todos los casos, la rapidez de la bola cuando comienza a moverse hacia arriba del segundo plano es la misma para todos los casos. Si asciende por una pendiente inclinada, pierde muy pronto su rapidez. En una pendiente menos inclinada, pierde su rapidez más lentamente y rueda durante más tiempo. Cuanto menos inclinada sea la pendiente ascendente, más lentamente perderá su rapidez. En el caso extremo donde no haya pendiente en absoluto, es decir, cuando el plano sea horizontal, la bola no debe perder rapidez alguna. En ausencia de fuerzas retardadoras, la tendencia de la bola es moverse por siempre sin frenar. A esta propiedad de un objeto de resistir los cambios en el movimiento se le denomina **inercia**.

El concepto de inercia de Galileo desacreditó la teoría aristotélica del movimiento. Aristóteles no reconoció la idea de la inercia porque no imaginó cómo sería el movimiento sin fricción. En su experiencia, todos los movimientos están sujetos a una resistencia, e hizo de este suceso el centro de su teoría del movimiento. El hecho de que Aristóteles no reconociera la fricción por lo que es (una fuerza como cualquier otra) impidió el avance de la física durante casi 2,000 años, hasta la época de Galileo. Una aplicación del concepto de inercia de Galileo demostraría que no se necesita fuerza para mantener el movimiento continuo de la Tierra. Estaba abierto el camino para que Isaac Newton sintetizara una nueva visión del Universo.

pti

- Galileo publicó el primer tratamiento matemático del movimiento en 1632, 12 años después de que los peregrinos desembarcaran en Plymouth Rock.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Sería correcto decir que la inercia es la *razón* por la que un objeto en movimiento continúa en movimiento cuando ninguna fuerza actúa sobre él?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

En sentido estricto, no. No se conoce la razón por la que los objetos persisten en su movimiento cuando ninguna fuerza actúa sobre ellos. A la propiedad de los objetos materiales para comportarse de esta forma predecible se le conoce como *inercia*. Se entienden muchas cosas y se tienen etiquetas y nombres para dichas cosas. Hay muchas cosas que no se entienden, y también se tienen etiquetas y nombres para dichas cosas. La educación no consiste tanto en adquirir nuevos nombres y etiquetas, sino en saber cuáles fenómenos se entienden y cuáles no.

En 1642, muchos meses después de la muerte de Galileo, nació Isaac Newton. Para cuando Newton tenía 23 años de edad, elaboró sus famosas leyes del movimiento, que terminaron de derribar las ideas aristotélicas que dominaron el pensamiento de las mejores mentes durante casi dos milenios. En este capítulo se aborda la primera de las leyes de Newton, un replanteamiento del concepto de inercia como lo propuso antes Galileo. (Las tres leyes de Newton del movimiento aparecieron por primera vez en uno de los más importantes libros de todos los tiempos: los *Principia* de Newton.)

La inercia no es un tipo de fuerza; es una *propiedad* de toda la materia de resistir a los cambios en el movimiento.

[2]Tomado de *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*, de Galileo.

## 2.3 Primera ley de Newton de movimiento

**VIDEO: Ley de Newton de inercia**

La idea de Aristóteles de que un objeto en movimiento debe ser impulsado por una fuerza constante fue desechada completamente por Galileo, quien afirmó que, en *ausencia* de una fuerza, un objeto en movimiento continuará moviéndose. La tendencia de las cosas a resistir los cambios en el movimiento fue lo que Galileo llamó *inercia.* Newton perfeccionó la idea de Galileo y la convirtió en su primera ley, llamada adecuadamente **ley de la inercia**. De los *Principia* de Newton (traducido del original en latín):

> **Todo objeto continúa en un estado de reposo o de rapidez uniforme en una línea recta a menos que sobre él actúe una fuerza neta distinta de cero.**

La palabra clave en esta ley es *continúa:* un objeto *continúa* haciendo lo que esté haciendo a menos que sobre él se ejerza una fuerza. Si está en reposo, *continúa* en un estado de reposo. Esto se demuestra de forma graciosa cuando un mantel se retira habilidosamente de debajo de los platos en una mesa y los platos quedan en su estado inicial de reposo. Se subraya que esta propiedad de los objetos de resistir los cambios en el movimiento se llama inercia.

**FIGURA 2.4**
La inercia en acción.

**VIDEO: El viejo truco del mantel**

Si un objeto está en movimiento, *continúa* moviéndose sin dar la vuelta o cambiar su rapidez. Esto es evidente en las sondas espaciales que se mueven de manera continua en el espacio exterior. Los cambios en el movimiento tienen que imponerse contra la tendencia de un objeto de conservar su estado de movimiento. En ausencia de fuerzas netas, un objeto en movimiento tiende a moverse a lo largo de una línea recta de manera indefinida.

Puedes pensar en la inercia como otra palabra para llamar a la *pereza* (o resistencia al cambio).

**FIGURA 2.5**
Ejemplos de inercia.

¿Por qué la moneda caerá en el vaso cuando una fuerza acelere la tarjeta?

¿Por qué un aumento continuo y lento de la fuerza descendente rompe la cuerda por arriba de la bola sólida, pero un aumento súbito rompe la cuerda inferior?

¿Por qué el movimiento descendente y la súbita detención del martillo aprieta la cabeza del martillo?

**VIDEO: Rollo de papel sanitario**

**VIDEO: Inercia de un cilindro**

**VIDEO: Inercia de un yunque**

### PUNTO DE CONTROL

**Un disco de hockey que se desliza por el hielo finalmente llega al reposo. ¿Cómo interpretaría Aristóteles este comportamiento? ¿Cómo lo interpretarían Galileo y Newton? ¿Cómo lo interpretarías tú? *(¡Piensa antes de leer las respuestas!)***

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

Aristóteles probablemente diría que el disco se desliza hasta detenerse porque busca su estado propio y natural, un estado de reposo. Galileo y Newton probablemente dirían que, una vez en movimiento, el disco continúa en movimiento y que lo que impide que el movimiento continúe no es su naturaleza o su estado de reposo propio, sino la fricción que encuentra el disco. Esta fricción es pequeña comparada con la fricción entre el disco y un suelo de madera, por lo que el disco se desliza mucho más lejos sobre el hielo. Sólo tú puedes responder la última pregunta.

## ENSAYO PERSONAL

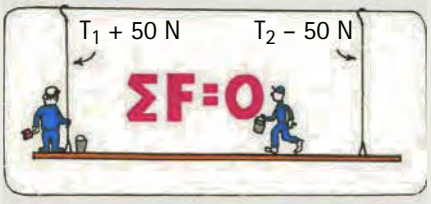
Cuando estaba en bachillerato, mi asesor me sugirió no inscribirme en cursos de ciencia y matemática, y en vez de ello me centrara en lo que parecía ser mi don para las artes. Seguí este consejo. En ese entonces estaba interesado en dibujar tiras cómicas y en el boxeo, ninguna de las cuales me auguraban mucho éxito. Después de una temporada en el ejército, probé suerte pintando señales, y los fríos inviernos de Boston me llevaron al sur, a la más cálida ciudad de Miami, Florida. Ahí, a los 26 años de edad, conseguí un trabajo pintando carteleras y conocí a un hombre que se convirtió en una gran influencia intelectual para mí: Burl Grey. Como yo, Burl nunca estudió física en el bachillerato. Pero era un apasionado de la ciencia en general, y compartía su pasión con muchas preguntas mientras pintábamos juntos. Recuerdo que Burl me preguntaba sobre las tensiones de las cuerdas que sostenían el andamio donde estábamos. El andamio era simplemente una pesada plancha horizontal suspendida por un par de sogas. Burl hacía vibrar la soga más cercana a su extremo del andamio y me pedía hacer lo mismo con la mía. Comparaba las tensiones en ambas sogas, para determinar cuál era más grande. Burl era más pesado que yo y razonaba que la tensión de su soga era mayor. Al igual que una cuerda de guitarra más firmemente estirada, la soga con mayor tensión vibraba con un tono más alto. El hallazgo de que la soga de Burl tenía un tono más alto parecía razonable porque su soga soportaba más carga.

Cuando yo caminaba hacia Burl para que me prestara sus brochas, él preguntaba si las tensiones de las sogas habían cambiado. ¿La tensión de su soga aumentaba a medida que me acercaba a él? Estuvimos de acuerdo en que tenía que ser así, porque incluso más de la carga era soportada por la soga de Burl. ¿Y qué hay de mi soga? ¿Su tensión disminuiría? Estuvimos de acuerdo en que lo haría, porque soportaría menos de la carga total. En aquel momento yo no me daba cuenta de que estábamos discutiendo física. Burl y yo usábamos la exageración para estimular nuestro razonamiento (tal como hacen los físicos). Si ambos nos parábamos en un extremo del andamio y nos inclinábamos hacia afuera, era fácil imaginar que el extremo opuesto del andamio se elevaría como el extremo de un subibaja, con la soga opuesta floja. Entonces no habría tensión en dicha soga. Luego razonamos que la tensión de mi soga disminuiría de manera gradual a medida que caminara hacia Burl. Era divertido plantear tales preguntas y ver si podíamos responderlas.

Una pregunta que no podíamos responder era si la reducción de tensión en mi soga cuando me alejaba de ella sería o no *exactamente* compensada por un aumento de tensión en la soga de Burl. Por ejemplo, si mi soga experimentara una reducción de 50 newtons, ¿la soga de Burl ganaría 50 newtons? (En aquella época hablábamos de libras, pero aquí uso la unidad científica de fuerza, el *newton*, que se abrevia N.) ¿La ganancia sería *exactamente* 50 N? Y, si fuera así, ¿esta sería una gran coincidencia? Yo no supe la respuesta sino hasta más de un año después, cuando, gracias al estímulo de Burl, abandoné la pintura de tiempo completo para ir a la universidad a aprender más sobre ciencia.[3]

En la universidad aprendí que cualquier objeto en reposo, como el andamio para pintar carteleras que nos sostenía, se dice que está en equilibrio. Esto es: todas las fuerzas que actúan sobre él se equilibran en cero. De modo que la suma de las fuerzas ascendentes suministradas por las sogas de sostén de hecho compensaban nuestros pesos más el peso del andamio. Una pérdida de 50 N en una se acompañaría por una ganancia de 50 N en la otra.

Cuento esta historia verdadera para demostrar que uno piensa de un modo muy diferente cuando hay una regla que guíe ese pensamiento. Ahora, cuando miro cualquier objeto inmóvil, sé de inmediato que todas las fuerzas que actúan sobre él se cancelan. La




naturaleza se observa de manera diferente cuando se conocen sus reglas. Sin las reglas de la física, uno tiende a ser supersticioso y a ver magia donde no la hay. Es admirable cómo todo está conectado con todo lo demás por un número sorprendentemente pequeño de reglas, y de un modo hermosamente sencillo. La física se ocupa de estudiar las reglas de la naturaleza.

[3]Siempre estaré en deuda con Burl Grey por el estímulo que me proporcionó, porque, cuando continué mi educación formal, lo hice con entusiasmo. Perdí contacto con Burl durante 40 años. Después, un estudiante de mi clase en el Exploratorium de San Francisco, Jayson Wechter, quien era detective privado, localizó a Burl en 1998 y nos puso en contacto. La amistad se renovó y nuevamente continuamos las conversaciones animadas.

## 2.4 Fuerza neta y vectores

**SCREENCAST: Vectores de fuerza neta**

**VIDEO: Definición de newton**

Los cambios en el movimiento se producen por una fuerza o combinación de fuerzas (en el siguiente capítulo, los cambios en el movimiento se referirán como *aceleración*). Una **fuerza**, en el sentido más simple, es un empujón o un tirón. Su fuente puede ser gravitacional, eléctrica, magnética o simplemente esfuerzo muscular. Cuando hay más de una fuerza que actúa sobre un objeto, se considera la **fuerza *neta***. Por ejemplo, si tú y un amigo tiran en la misma dirección con fuerzas iguales sobre un objeto, las fuerzas se combinan para producir una fuerza neta del doble de su fuerza individual. Si cada uno de ustedes tira con iguales fuerzas en direcciones *opuestas* la fuerza neta es cero. Las fuerzas iguales pero con dirección opuesta se cancelan entre sí. Se puede considerar que una de las fuerzas es la negativa de la otra, y algebraicamente suman cero, con una fuerza neta resultante de cero.

La Figura 2.6 muestra cómo se combinan las fuerzas para producir una fuerza neta. Un par de fuerzas de 5 newtons en la misma dirección produce una fuerza neta de 10 newtons (el newton, N, es la unidad científica de fuerza). Si las fuerzas de 5 newtons están en direcciones opuestas, la fuerza neta es cero. Si 10 newtons de fuerza se ejercen hacia la derecha y 5 newtons hacia la izquierda, la fuerza neta es 5 newtons hacia la derecha. Las fuerzas se muestran con flechas. Cuando la longitud y la dirección de dichas flechas se dibujan a escala, a la flecha se le denomina **vector**.

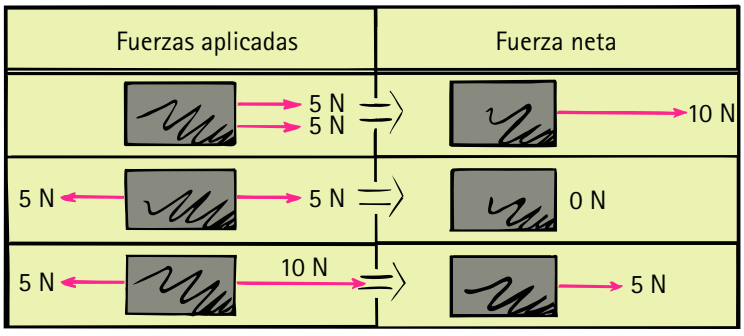



**FIGURA 2.6**
Fuerza neta (una fuerza de 5 N es aproximadamente 1.1 lb).

Cualquier cantidad que requiere tanto magnitud como dirección para una descripción completa es una **cantidad vectorial** (Figura 2.7). Algunos ejemplos de cantidades vectoriales son fuerza, velocidad y aceleración. Por el contrario, una cantidad que puede describirse sólo con una magnitud, sin involucrar dirección, se denomina **cantidad escalar**. La masa, el volumen y la rapidez son cantidades escalares.

**FIGURA 2.7**
Este vector, a escala de modo que 1 cm es igual a 20 N, representa una fuerza de 60 N hacia la derecha.

Sumar vectores que actúan a lo largo de direcciones paralelas es asunto sencillo: si actúan en la misma dirección, se suman; si actúan en direcciones opuestas, se restan. La suma de dos o más vectores se denomina **resultante**. Para encontrar la resultante de

El vector cupido dice: "yo sólo era un escalar hasta que tú llegaste y me diste dirección".

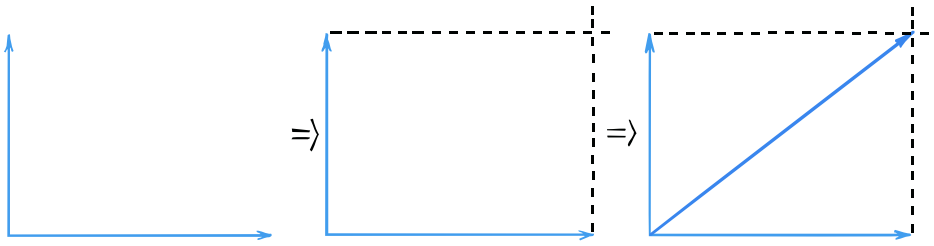


**FIGURA 2.8**
El par de vectores mutuamente perpendiculares forman dos lados de un rectángulo, cuya diagonal es su resultante.

dos vectores que no actúan exactamente en la misma dirección o en dirección opuesta, se utiliza la *regla del paralelogramo*.[4] Construye un paralelogramo en el que los dos vectores sean los lados adyacentes: la diagonal del paralelogramo muestra la resultante. En la Figura 2.8, los paralelogramos son rectángulos.

En el caso especial de dos vectores que tienen la misma magnitud y son mutuamente perpendiculares, el paralelogramo es un cuadrado (Figura 2.9). Dado que para cualquier cuadrado la longitud de una diagonal es $\sqrt{2}$, o 1.41, veces uno de los lados, la resultante es $\sqrt{2}$ veces uno de los vectores. Por ejemplo, la resultante de dos vectores perpendiculares con igual magnitud de 100 es 141.

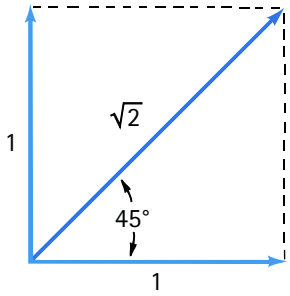



**FIGURA 2.9**
Cuando se suman un par de vectores perpendiculares y con la misma longitud, forman un cuadrado. La diagonal del cuadrado es la resultante y su valor es $\sqrt{2}$ veces la longitud de cualquier lado.

## Vectores de fuerza

La Figura 2.10 muestra un par de fuerzas que actúan sobre una caja. Una es de 30 newtons y la otra es de 40 newtons. Una medición simple muestra que la resultante de este par de fuerzas es de 50 newtons.

La Figura 2.11 muestra a Nellie Newton colgando en reposo de un tendedero. Observa que el tendedero actúa como un par de sogas que forman diferentes ángulos con la vertical. Los tres pasos que se muestran ahí son tres fuerzas que actúan sobre Nellie: su peso, una tensión del lado izquierdo de la soga y una tensión del lado derecho de la soga. Debido a los diferentes ángulos, en cada lado de la soga habrá distintas tensiones. Puesto que Nellie cuelga en equilibrio, las dos tensiones de la soga deben sumarse vectorialmente para igualar y oponerse a su peso. ¿Cuál lado tiene mayor tensión? La regla del paralelogramo muestra que la tensión en la soga derecha es mayor que la tensión en la soga izquierda. Si mides los vectores, verás que la tensión en la soga derecha es aproximadamente el doble que la tensión en la soga izquierda. Ambas tensiones de soga se combinan para sostener el peso de Nellie.

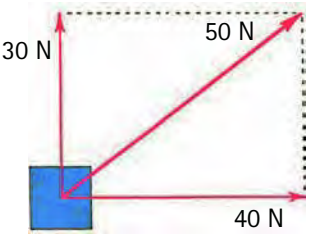



**FIGURA 2.10**
La resultante de las fuerzas de 30 N y 40 N es 50 N.

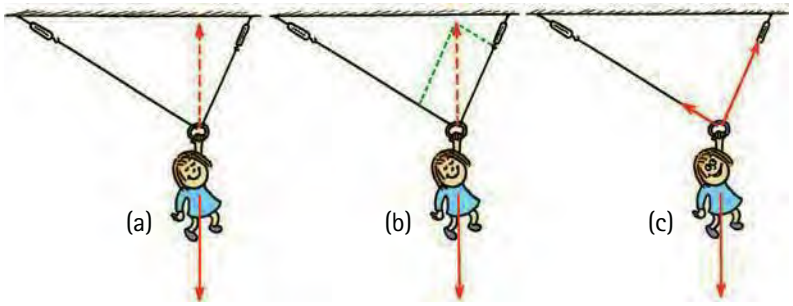



**FIGURA 2.11**
(a) La fuerza debida a la gravedad sobre Nellie se muestra mediante el vector vertical descendente. Para el equilibrio se necesita un vector igual y opuesto, que se muestra con el vector punteado. (b) Este vector punteado es la diagonal de un paralelogramo definido por las líneas verdes. (c) Ambas tensiones de soga se muestran mediante los vectores construidos. La tensión es mayor en la soga derecha, la que tiene más probabilidad de romperse.

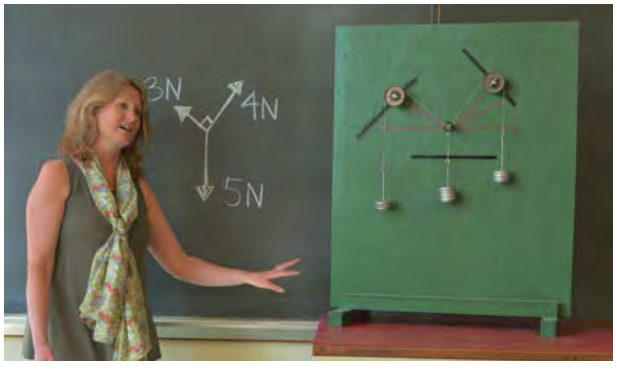



**FIGURA 2.12**
Diana Lininger Markham ilustra la disposición de los vectores de la Figura 2.11.

**SCREENCAST: Tensión de la soga de Nellie**

**SCREENCAST: Las sogas de Nellie**

[4]Un paralelogramo es una figura de cuatro lados y cuyos lados opuestos son paralelos entre sí. Por lo general, para determinar la longitud de la diagonal realizas una medición, pero en el caso especial en el que los dos vectores **X** y **Y** son perpendiculares (un cuadrado o un rectángulo), puedes aplicar el teorema de Pitágoras, $\mathbf{R^2 = X^2 + Y^2}$, para encontrar la resultante: $\mathbf{R = \sqrt{X^2 + Y^2}}$.

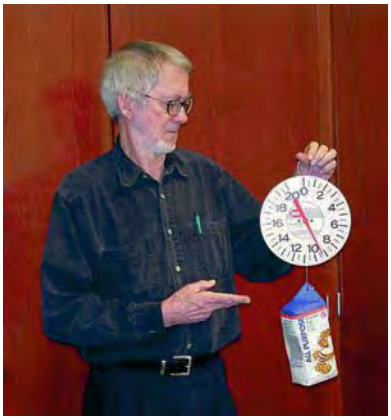


**FIGURA 2.13**
Burl Grey, quien introdujo al autor en las fuerzas de tensión, suspende una bolsa de harina de 2 lb de un dinamómetro, que muestra su peso y la tensión de la cuerda de aproximadamente 9 N.

En el Apéndice D al final de este libro puedes encontrar más sobre los vectores de fuerza, así como en la sección *Practicando la física*. En el siguiente capítulo estudiarás los vectores de velocidad.

## 2.5 La regla del equilibrio

Si amarras una cuerda alrededor de una bolsa de harina de 2 libras y la cuelgas de una báscula (Figura 2.13), un resorte de la báscula se estira hasta que en la báscula se lee 2 libras. El resorte estirado está bajo una "fuerza de elongación" llamada *tensión.* La misma báscula en un laboratorio de ciencias es probable que esté calibrada para leer la misma fuerza como 9 newtons. Tanto las libras como los newtons son unidades de peso, que a su vez son unidades de *fuerza.* La bolsa de harina es atraída hacia la Tierra con una fuerza gravitacional de 2 libras o, su equivalente, 9 newtons. Cuelga de la báscula el doble de harina y la lectura será 18 newtons.

Observa que existen dos fuerzas que actúan sobre la bolsa de harina: la fuerza de tensión que actúa hacia arriba y el peso que actúa hacia abajo. Las dos fuerzas sobre la bolsa son iguales y opuestas, y se cancelan para dar cero. Por tanto, la bolsa permanece en reposo. De acuerdo con la primera ley de Newton, ninguna fuerza neta actúa sobre la bolsa. La primera ley de Newton se puede ver de un modo distinto: *equilibrio mecánico.*

Cuando la fuerza neta sobre un cuerpo es cero, se dice que dicho cuerpo está en **equilibrio mecánico**.[5] En notación matemática, la **regla del equilibrio** es

$$\sum \boldsymbol{F} = 0$$

El símbolo $\sum$ representa la "suma vectorial de" y $\boldsymbol{F}$ representa las "fuerzas". Para un objeto suspendido en reposo, como la bolsa de harina, la regla dice que las fuerzas que actúan hacia arriba sobre el objeto deben estar equilibradas por otras fuerzas que actúen hacia abajo, de modo que la suma vectorial sea igual a cero. (Las cantidades vectoriales tienen en cuenta la dirección, de modo que si las fuerzas ascendentes son $+$, las fuerzas descendentes son $-$, y cuando se suman en realidad se restan.)

En la Figura 2.14 se observan las fuerzas que intervienen en el andamio que Burl y Hewitt usan para pintar. La suma de las tensiones ascendentes es igual a la suma de sus pesos más el peso del andamio. Observa cómo las magnitudes de los dos vectores ascendentes son iguales a la magnitud de los tres vectores descendentes. La fuerza neta sobre el andamio es cero, así que se dice que está en equilibrio mecánico.

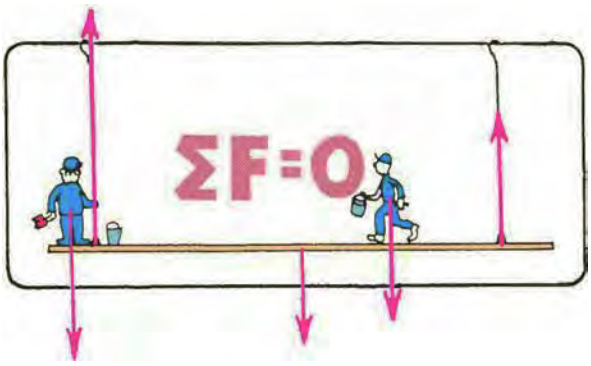


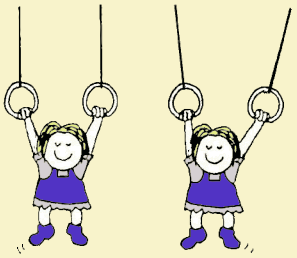

**FIGURA 2.14**
La suma de las fuerzas ascendentes es igual a la suma de las fuerzas descendentes. $\sum \boldsymbol{F} = 0$ y el andamio está en equilibrio.

**SCREENCAST: Diagramas de vectores de fuerza**

[5]Un objeto que está en equilibrio está sin cambio en su estado de movimiento. Cuando estudies el movimiento rotacional en el capítulo 8, verás que otra condición para el equilibrio mecánico es que el *momento de torsión (torque)* neto sea igual a cero.

## PUNTO DE CONTROL

**Observa a la gimnasta que cuelga de los anillos.**



1. **Si cuelga con su peso dividido equitativamente entre los dos anillos, ¿cómo se compararían con su peso las lecturas de la báscula en ambas cuerdas de sostén?**
2. **Supón que cuelga con un poco más de su peso soportado por el anillo izquierdo. ¿Cuál será la lectura de la báscula derecha?**

Todo lo que no experimenta cambio en su movimiento está en equilibrio mecánico. Esto ocurre cuando $\sum F = 0$.

**VIDEO: Regla del equilibrio**

**VIDEO: Problemas de equilibrio**

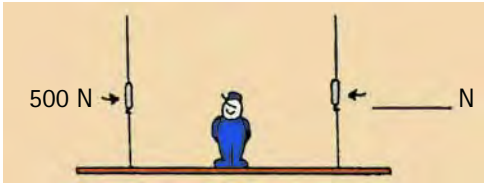
### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

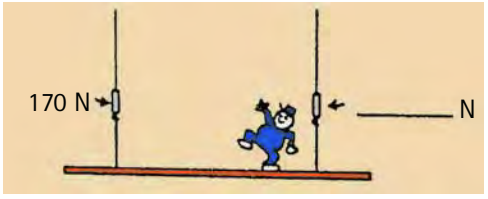
*(¿Estás leyendo esto antes de formular respuestas razonadas en tu pensamiento? Si es así, ¿para ejercitar tu cuerpo miras a otros hacer planchas (lagartijas)? Ejercita tu pensamiento: cuando encuentres las muchas preguntas de la sección Punto de control a lo largo de este libro, ¡piensa antes de leer las respuestas!)*

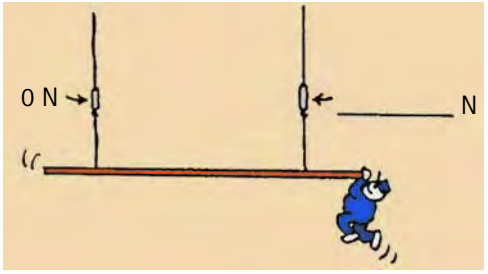
1. La lectura en cada báscula será la mitad de su peso. La suma de las lecturas de ambas básculas, entonces, es igual a su peso.
2. Cuanto más de su peso sostenga el anillo izquierdo, la lectura de la báscula derecha será menor. ¿Puedes ver que esta es una situación menos exagerada que la mostrada en la Figura 2.11, con las sogas izquierda y derecha invertidas?

## PRACTICANDO LA FÍSICA

1. Cuando Burl está solo, parado exactamente en medio de su andamio, la lectura de la báscula izquierda es de 500 N. Escribe la lectura de la báscula derecha. El peso total de Burl y el andamio debe ser _____ N.
2. Burl se aleja del extremo izquierdo. Escribe la lectura de la báscula derecha.
3. Para divertirse, Burl se cuelga del extremo derecho. Escribe la lectura de la báscula derecha.




### Respuestas a Practicando la física

¿Tus respuestas ilustran la regla del equilibrio? En la pregunta 1, la soga derecha experimenta **500 N** de tensión porque Burl está en medio y ambas sogas soportan su peso por igual. Dado que la suma de las tensiones hacia arriba es 1,000 N, el peso total de Burl y el andamio debe ser **1,000 N**. Llama a las fuerzas de tensión ascendentes + 1,000 N. Entonces, los pesos descendentes son − 1,000 N. ¿Qué ocurre cuando sumas + 1,000 N y − 1,000 N? La respuesta es que son igual a cero. Así ves que $\sum \boldsymbol{F} = 0$.

En la pregunta 2, ¿obtuviste la respuesta correcta de **830 N**? Razonamiento: a partir de la pregunta 1 sabes que la suma de las tensiones de la soga es igual a 1,000 N, y dado que la soga izquierda tiene una tensión de 170 N, la otra soga debe compensar la diferencia: esto es, 1,000 N − 170 N= 830 N. ¿Lo tienes? Si es así, excelente. Si no, habla con tus amigos hasta que lo consigas. Luego lee un poco más.

La respuesta a la pregunta 3 es **1,000 N**. ¿Ves que esto ilustra que $\sum \boldsymbol{F} = 0$?

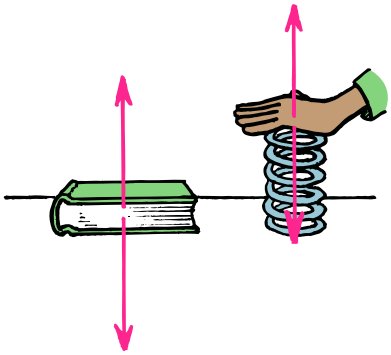


**FIGURA 2.15**
(Izquierda) La mesa empuja sobre el libro con tanta fuerza como la fuerza descendente de la gravedad sobre el libro. (Derecha) El resorte empuja sobre tu mano con tanta fuerza como la que tú ejerces para empujar hacia abajo el resorte.

**FIGURA 2.16**
Tu peso es la fuerza que ejerces sobre una superficie de sostén, que, cuando estás en equilibrio, es la fuerza gravitacional sobre ti. La lectura de la báscula muestra el valor tanto de tu peso como de la fuerza de sostén.

## 2.6 Fuerza de sostén

Piensa en un libro que yace en reposo sobre una mesa. Está en equilibrio. ¿Qué fuerzas actúan sobre el libro? Una fuerza es la de la gravedad: el *peso* del libro. Dado que el libro está en equilibrio, debe haber otra fuerza que actúe sobre el libro para producir una fuerza neta de cero: una fuerza ascendente opuesta a la fuerza de gravedad de la Tierra. La mesa ejerce esta fuerza ascendente. A ésta se le llama *fuerza de sostén* ascendente. Esta fuerza de sostén ascendente, con frecuencia denominada *fuerza normal,* debe igualar el peso del libro.[6] Si la fuerza ascendente se denomina positiva, entonces el peso descendente es negativo, y los dos suman cero. La fuerza neta sobre el libro es cero. Otra forma de decir lo mismo es $\sum \boldsymbol{F} = 0$.

Para entender mejor que la mesa empuja sobre el libro, compara el caso de comprimir un resorte (Figura 2.15). Si tú empujas el resorte hacia abajo, puedes sentir que el resorte empuja hacia arriba sobre tu mano. De igual modo, el libro que yace sobre la mesa comprime átomos en la mesa, que se comportan como resortes microscópicos. El peso del libro presiona hacia abajo sobre los átomos, y ellos presionan hacia arriba sobre el libro. De esta forma, los átomos comprimidos producen la fuerza de sostén.

Cuando te paras sobre una báscula de baño, dos fuerzas actúan sobre la báscula. Una es tu empuje hacia abajo sobre la báscula, el resultado del tirón de la gravedad sobre ti, y la otra es la fuerza de sostén hacia arriba del piso. Estas fuerzas presionan un mecanismo (en efecto, un resorte) en el interior de la báscula que está calibrado para mostrar la magnitud de la fuerza de sostén (Figura 2.16). La fuerza con la que empujas hacia abajo sobre la báscula es tu peso, que tiene la misma magnitud que la fuerza de sostén ascendente. Cuando estás en equilibrio, tu peso es igual a la fuerza de gravedad que actúa sobre ti.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Cuál es la fuerza neta sobre una báscula de baño cuando una persona de 150 libras se para en ella?**
2. **Supón que te paras sobre dos básculas de baño con tu peso dividido equitativamente entre las dos básculas. ¿Cuál será la lectura de cada báscula? ¿Qué ocurrirá si apoyas más de tu peso en un pie que en el otro?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Cero, como lo demuestra la báscula que permanece en reposo. La báscula lee la *fuerza de sostén,* que tiene la misma magnitud que el peso, no la fuerza neta.
2. La lectura de cada báscula es la mitad de tu peso. Entonces, la suma de las lecturas de las básculas equilibrará tu peso y la fuerza neta sobre ti será cero. Si te apoyas más en una báscula que en otra, más de la mitad de tu peso se leerá en dicha báscula, pero menos en la otra, de modo que seguirán sumando tu peso. Como el ejemplo de la gimnasta que cuelga de los anillos, si una báscula lee dos tercios de tu peso, la otra báscula leerá un tercio de tu peso.

Que una fuerza neta sobre un objeto sea igual a cero no significa que el objeto deba estar en reposo, sino que su estado de movimiento permanece invariable. Puede estar en reposo o en movimiento uniforme en línea recta.

## 2.7 Equilibrio de cosas en movimiento

El reposo sólo es una forma de equilibrio. Un objeto que se mueve con rapidez constante en una línea recta también está en equilibrio. El equilibrio es un estado de no cambio. Una bola de boliche que rueda con rapidez constante en línea recta está en equilibrio, hasta que golpea los pinos. Ya sea que un objeto esté en reposo (equilibrio estático) o que ruede de manera constante en línea recta (equilibrio dinámico), $\sum \boldsymbol{F} = 0$.

De acuerdo con la primera ley de Newton, un objeto que está bajo la influencia de una sola fuerza, no puede estar en equilibrio. La fuerza neta podría no ser cero. Sólo cuando dos o más

[6]En geometría, "normal a" significa "en ángulo recto con respecto a". Dado que esta fuerza empuja hacia arriba en ángulo recto con respecto a la superficie, se le denomina "fuerza normal".

fuerzas actúan sobre un objeto, éste puede estar en equilibrio. Para comprobar si algo está o no en equilibrio hay que observar si experimenta o no cambios en su estado de movimiento.

Piensa en una caja que se empuja horizontalmente por el piso de una fábrica. Si se mueve con una rapidez constante en línea recta, está en equilibrio dinámico. Esto te dice que más de una fuerza actúa sobre la caja. Existe otra fuerza, probablemente la fuerza de fricción entre la caja y el suelo. El hecho de que la fuerza neta sobre la caja sea igual a cero significa que la fuerza de fricción debe ser igual y opuesta a la fuerza de empuje.

La regla del equilibrio, $\sum \boldsymbol{F} = 0$, ofrece una forma razonada de ver todas las cosas en reposo: rocas en equilibrio, los objetos de tu habitación o las vigas de acero de los puentes o de la construcción de edificios. Cualquiera que sea su configuración, si un objeto está en equilibrio estático, todas las fuerzas que actúan siempre se equilibran a cero. Lo mismo sucede con los objetos que se mueven de manera constante, que no aceleran, frenan o cambian de dirección. En cuanto al equilibrio dinámico, todas las fuerzas que actúan también se equilibran a cero. La regla del equilibrio te permite ver más de lo que ve el observador casual. Es bueno saber las razones de la estabilidad de las cosas del mundo cotidiano.

Existen diferentes formas de equilibrio. En el Capítulo 8 se abordará el equilibrio rotacional y, en la Parte 4, se estudiará el equilibrio térmico asociado al calor. La física está en todas partes.

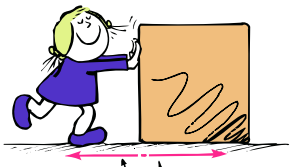



**FIGURA 2.17**
Cuando el empuje sobre la caja es tan grande como la fuerza de fricción que el piso ejerce sobre la caja, la fuerza neta sobre la caja es cero y se desliza con una rapidez constante.

**PUNTO DE CONTROL**

**Un avión vuela con rapidez constante en una trayectoria horizontal recta. En otras palabras: el avión que vuela está en equilibrio. Dos fuerzas horizontales actúan sobre el avión. Una es el empuje de los propulsores que lo impulsan hacia adelante, y la otra es la fuerza de la resistencia del aire que actúa en la dirección opuesta. ¿Cuál fuerza es mayor?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Ambas fuerzas tienen la misma magnitud. Llama positiva a la fuerza hacia adelante ejercida por los propulsores. Entonces, la resistencia del aire es negativa. Dado que el avión está en equilibrio dinámico, ¿puedes ver que las dos fuerzas combinadas son igual a cero? Por tanto, ni gana ni pierde rapidez.

## 2.8 La Tierra en movimiento

Cuando Copérnico anunció la idea de una Tierra en movimiento en el siglo XVI, el concepto de inercia no se comprendía. Hubo mucha controversia y debate acerca de si la Tierra se movía o no. La cantidad de fuerza necesaria para mantener la Tierra en movimiento era inimaginable. Otro argumento en contra de una Tierra en movimiento fue el siguiente: piensa en un ave sentada en reposo en la cima de un árbol alto. En el suelo hay un gusano gordo y jugoso. El ave ve el gusano, cae verticalmente y lo atrapa. Esto sería imposible, se afirmaba, si la Tierra se moviera como Copérnico sugería. Si Copérnico estuviera en lo correcto, la Tierra tendría que viajar con una rapidez de 107,000 kilómetros por hora para dar una vuelta alrededor del Sol en un año. Convierte esta rapidez a kilómetros por segundo y obtendrás 30 kilómetros por segundo. Incluso si el ave pudiera descender de su rama en un segundo, el gusano se habría desplazado una distancia de 30 kilómetros por el movimiento de la Tierra. Sería imposible que un ave descendiera en línea recta y atrapara un gusano. Pero las aves, de hecho, *atrapan* gusanos desde las ramas de los árboles altos, lo que parece clara evidencia de que la Tierra debe estar en reposo.

¿Puedes refutar este argumento? Puedes hacerlo si invocas la idea de inercia. Como ves, no sólo la Tierra se mueve a 30 kilómetros por segundo, sino también el árbol, la rama del árbol, el ave sobre la rama, el gusano que está abajo e incluso el aire entre ellos. Todos se mueven a 30 kilómetros por segundo. Las cosas en movimiento permanecen en movimiento si no actúan sobre ellas fuerzas no equilibradas. De modo que, cuando el ave baja de la

**FIGURA 2.18**
¿Puede el ave descender en línea recta y atrapar al gusano si la Tierra se mueve a 30 km/s?

**FIGURA 2.19**
Cuando lanzas una moneda en un avión a gran rapidez, ésta se comporta como si el avión estuviera en reposo. La moneda sigue contigo, ¡la inercia en acción!

rama, su movimiento lateral inicial de 30 kilómetros por segundo permanece inalterado. Atrapa al gusano, muy quitado de la pena por el movimiento de todo su entorno.

Párate junto a una pared. Salta de modo que despegues los pies del piso. ¿La pared a 30 kilómetros por segundo te golpeará? No, porque tú también viajas a 30 kilómetros por segundo: antes, durante y después de tu salto. Los 30 kilómetros por segundo es la rapidez de la Tierra en relación con el Sol, no la rapidez de la pared en relación contigo.

Hace 400 años, a las personas se les hacía difícil entender ideas como ésta, no sólo porque no reconocían el concepto de inercia, sino porque no estaban acostumbradas a moverse en vehículos de gran rapidez. Los viajes lentos sobre caminos llenos de baches en carruajes tirados por caballos no se prestaban para experimentos que revelaran el efecto de la inercia. En la actualidad, puedes lanzar una moneda dentro de un automóvil, autobús o avión a gran rapidez, y puedes atrapar la moneda en movimiento vertical como lo harías si el vehículo estuviera en reposo. Ves evidencia de la ley de la inercia cuando el movimiento horizontal de la moneda antes, durante y después de atraparla es el mismo. La moneda sigue contigo. La fuerza vertical de la gravedad afecta sólo el movimiento vertical de la moneda.

Las nociones actuales de movimiento son muy diferentes de las de tus ancestros. Aristóteles no reconoció la idea de inercia porque no vio que todas las cosas en movimiento siguen las mismas reglas. Imaginó que las reglas del movimiento en el cielo eran muy diferentes de las reglas de movimiento sobre la Tierra. Vio el movimiento vertical como natural, pero el movimiento horizontal como innatural y que necesitaba una fuerza sostenida. Por otra parte, Galileo y Newton vieron que todas las cosas en movimiento seguían las mismas reglas. Para ellos, las cosas en movimiento *no* necesitaban fuerza para mantenerse en movimiento si no había fuerzas opuestas, como la fricción. Imagínate cuán diferente habría sido el avance de la ciencia si Aristóteles hubiera reconocido la unidad de todos los tipos de movimiento.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Inercia.** Propiedad de las cosas de resistir a cambios en el movimiento.

**Primera ley de Newton de movimiento (ley de la inercia).** Todo objeto continúa en un estado de reposo o de rapidez uniforme en una línea recta a menos que sobre él actúe una fuerza neta distinta de cero.

**Fuerza.** En el sentido más simple, un empuje o un tirón.

**Fuerza neta.** La suma vectorial de las fuerzas que actúan sobre un objeto.

**Vector.** Una flecha dibujada a escala para representar una cantidad vectorial.

**Cantidad vectorial.** Cantidad que tiene ambas, magnitud y dirección, como la fuerza.

**Cantidad escalar.** Cantidad que tiene magnitud pero no dirección, como la masa y el volumen.

**Resultante.** El resultado neto de una combinación de dos o más vectores.

**Equilibrio mecánico.** Estado de un objeto o sistema de objetos para los cuales no hay cambios en el movimiento. De acuerdo con la primera ley de Newton, si un objeto está en reposo, el estado de reposo persiste. Si un objeto se mueve, el movimiento continúa sin cambio.

**Regla del equilibrio.** Para cualquier objeto o sistema de objetos en equilibrio, la suma de las fuerzas que actúan es igual a cero. En forma de ecuación, $\sum \boldsymbol{F} = 0$.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

*La mayor parte de los capítulos de este libro termina con una serie de preguntas, actividades, problemas y ejercicios. Las* ***Preguntas conceptuales*** *están diseñadas para ayudarte a comprender las ideas y captar la esencia del material del capítulo. Observarás que las respuestas a las preguntas pueden encontrarse dentro de los capítulos. Las actividades* ***Piensa y realiza*** *se centran en aplicaciones prácticas (en este capítulo no hay ninguna de estas actividades). Los problemas simples de un solo paso,* ***Sustituye y listo****, son para que te familiarices con las ecuaciones (en este capítulo no hay este tipo de problemas). Tus habilidades matemáticas se aplican en los problemas de* ***Piensa y resuelve****, seguidos de las tareas de* ***Piensa y clasifica****, que te motivan a analizar y comparar las magnitudes de varias cantidades. Las actividades de fin de capítulo más importantes son los ejercicios* ***Piensa y explica****, que resaltan la síntesis de material y se centran en el pensamiento más que en el mero recuerdo de información. A menos que abarques sólo algunos capítulos en tu curso, es probable que se espere que abordes sólo algunos de estos ejercicios por cada capítulo. A continuación se encuentran las preguntas* ***Piensa y discute*** *que, como su nombre lo dice, tienen la intención de suscitar discusiones con tus compañeros de clase. ¡Ponte tu gorra de pensar y comienza!*

## 2.1 Aristóteles en movimiento

1. ¿Qué clase de movimiento, natural o violento, atribuía Aristóteles al movimiento de la Luna?
2. ¿Qué estado de movimiento atribuía Aristóteles a la Tierra?
3. ¿Qué relación formuló Copérnico entre el Sol y la Tierra?

## 2.2 Los experimentos de Galileo

4. ¿Qué descubrió Galileo en su legendario experimento en la torre inclinada de Pisa?
5. ¿Qué descubrió Galileo acerca de los cuerpos en movimiento y la fuerza en sus experimentos con planos inclinados?
6. ¿La inercia es la *razón* por la que los objetos en movimiento mantienen el movimiento o el *nombre* dado a esta propiedad?

## 2.3 Primera ley de Newton de movimiento

7. ¿Cómo se relaciona la primera ley de Newton con el concepto de inercia de Galileo?
8. ¿Qué tipo de trayectoria sigue un objeto en movimiento en ausencia de una fuerza?

## 2.4 Fuerza neta y vectores

9. ¿Cuál es la fuerza neta sobre un carro que se tira hacia la derecha con 100 libras y hacia la izquierda con 30 libras de fuerza?
10. ¿Por qué se dice que la fuerza es una cantidad vectorial?
11. De acuerdo con la regla del paralelogramo, ¿qué cantidad está representada por la diagonal de un paralelogramo construido?
12. ¿Cuál es la resultante de un par de fuerzas de una libra en ángulo recto?
13. Piensa en Nellie que cuelga en reposo en la Figura 2.11. Si las sogas fuesen verticales, sin ángulo involucrado, ¿cuál sería la tensión en cada soga?

## 2.5 La regla del equilibrio

14. ¿La fuerza puede expresarse en unidades de libras y también en unidades de newtons?
15. ¿Cuál es la fuerza neta sobre un objeto del que se tira con fuerzas de 80 newtons hacia la derecha y 80 newtons hacia la izquierda?
16. ¿Cuál es la fuerza neta sobre una bolsa jalada hacia abajo por la gravedad con una fuerza de 18 newtons y jalada hacia arriba por una soga con una fuerza de 18 newtons?
17. ¿Qué quiere decir que un objeto está en equilibrio mecánico?
18. Enuncia con notación simbólica la regla del equilibrio para fuerzas.

## 2.6 Fuerza de sostén

19. Piensa en un libro que pesa 15 N en reposo sobre una mesa plana. ¿Cuántos newtons de fuerza de sostén proporciona la mesa? ¿Cuál es la fuerza neta sobre el libro en este caso?
20. Cuando estás de pie en reposo sobre una báscula de baño, ¿cómo se compara tu peso con la fuerza de sostén de la báscula?

## 2.7 Equilibrio de cosas en movimiento

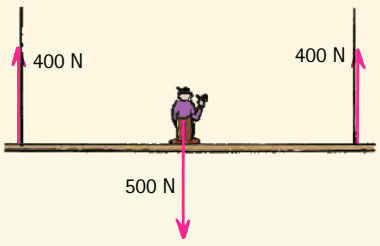
21. Una bola de boliche en reposo está en equilibrio. ¿La bola está en equilibrio cuando se mueve con rapidez constante en línea recta?
22. ¿Cuál es la fuerza neta sobre un objeto en equilibrio estático o dinámico?
23. Si empujas una caja con una fuerza de 100 N y ésta se desliza con velocidad constante, ¿cuánta es la fuerza de fricción que actúa sobre la caja?

## 2.8 La Tierra en movimiento

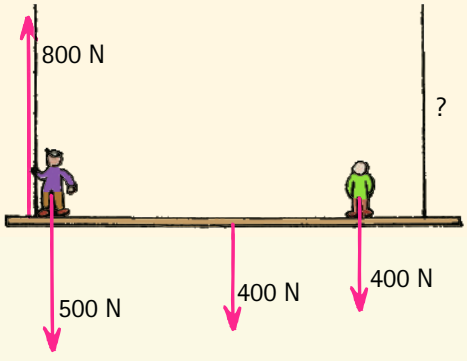
24. ¿Qué concepto no se entendió en el siglo XVI, cuando las personas no podían concebir una Tierra en movimiento?
25. Un ave se posa en un árbol que viaja a 30 km/s en relación con el Sol lejano. Cuando el ave desciende al suelo, ¿todavía se mueve a 30 km/s o esta rapidez se vuelve cero?
26. Párate junto a una pared que viaja a 30 km/s en relación con el Sol. Con los pies en el suelo, tú también viajas a los mismos 30 km/s. ¿Mantienes esta rapidez cuando tus pies dejan el suelo? ¿Qué concepto apoya tu respuesta?

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

27. Lucy Piesligeros está parada con un pie en una báscula de baño y el otro pie en una segunda báscula de baño. La lectura de cada báscula es de 350 N. ¿Cuál es el peso de Lucy?
28. Henry Pesopesado pesa 1,200 N y se para sobre un par de básculas de baño de modo que una báscula lee el doble que la otra. ¿Cuáles son las lecturas de las básculas?
29. El dibujo muestra el andamio de un pintor en equilibrio mecánico. La persona que está en medio del andamio pesa 500 N y las tensiones en cada soga son de 400 N. ¿Cuál es el peso del andamio?

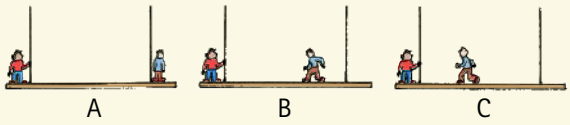



30. Un andamio diferente, que pesa 400 N, soporta dos pintores, uno de 500 N y otro de 400 N. La lectura de la báscula izquierda es de 800 N. ¿Cuál es la lectura de la báscula de la derecha?

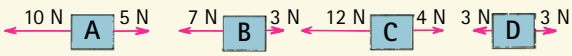


## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

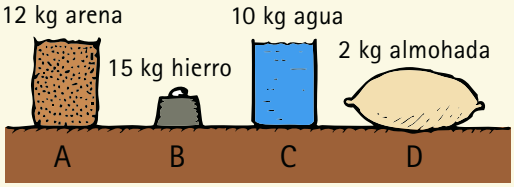
31. Los pesos de Burl, Paul y el andamio producen tensiones en las sogas de sostén. Clasifica las tensiones en la soga *izquierda*, de mayor a menor, en las tres situaciones, A, B y C.



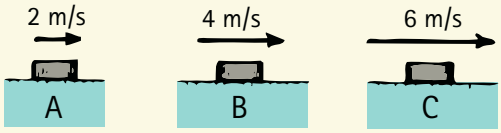

32. Clasifica las fuerzas netas sobre los cubos, de menor a mayor, en las cuatro situaciones, A, B, C y D.



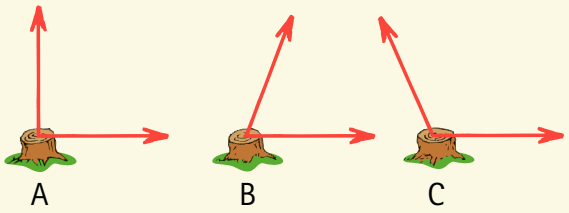

33. Diferentes materiales, A, B, C y D, descansan sobre una mesa.
    a. De mayor a menor, clasifícalos por cuánto resisten a que se les ponga en movimiento.
    b. De mayor a menor, clasifica las fuerzas de sostén (normal) que ejerce la mesa sobre ellos.



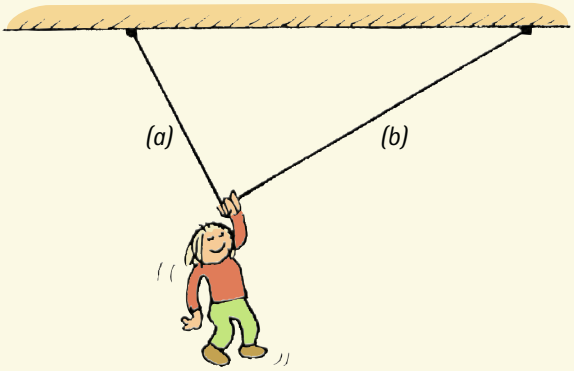

34. Tres discos, A, B y C, se muestran deslizándose por el hielo con las rapideces anotadas. Las fuerzas de fricción del aire y del hielo son insignificantes.
    a. De mayor a menor, clasifica las fuerzas necesarias para mantenerlos en movimiento.
    b. De mayor a menor, clasifica las fuerzas necesarias para detenerlos en el mismo intervalo de tiempo.




35. Visto desde arriba, un tocón es jalado con un par de sogas, cada una con una fuerza de 200 N, pero en diferentes ángulos, como se muestra. De mayor a menor, clasifica las fuerzas netas sobre los tocones.




36. Nellie cuelga inmóvil, con una mano, de un tendedero. ¿Cuál lado del tendedero, a o b, tiene mayor tensión?




## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

*Por favor: no te sientas intimidado por la gran cantidad de ejercicios de este libro. Como se mencionó antes, si el trabajo de tu curso abarca muchos capítulos, tu instructor probablemente asignará sólo algunos ejercicios de cada uno.*

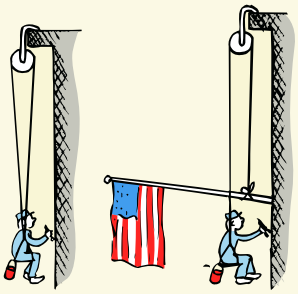
37. El conocimiento se puede lograr mediante lógica filosófica y también mediante experimentación. ¿Cuál de éstas prefirió Aristóteles y cuál prefirió Galileo?
38. Una bola que rueda por el suelo no sigue rodando indefinidamente. ¿Esto se debe a que busca un lugar de reposo o a que alguna fuerza actúa sobre ella? Si es lo último, identifica la fuerza.
39. Copérnico postuló que la Tierra se mueve alrededor del Sol (en lugar de la manera contraria), pero tuvo problemas con esta idea. ¿Qué conceptos de mecánica le faltaban (conceptos introducidos después por Galileo y Newton) que habrían aclarado sus dudas?
40. ¿Qué idea aristotélica desacreditó Galileo en su legendaria demostración en la torre inclinada?
41. ¿Qué idea aristotélica derribó Galileo con sus experimentos con planos inclinados?
42. ¿Quién propuso primero el concepto de inercia: Galileo o Newton?
43. Los asteroides se han movido a través del espacio durante miles de millones de años. ¿Qué los mantiene en movimiento?
44. Una sonda espacial puede transportarse en un cohete hacia el espacio exterior. ¿Qué mantiene el movimiento de la sonda después de que el cohete ya no la empuja?

45. Al hacer el truco del mantel para demostrar la inercia en la Figura 2.4, ¿por qué es importante que jales un poco hacia abajo cuando intentas retirar el mantel de debajo de los platos? (¿Qué ocurre si jalas ligeramente hacia arriba?)
46. Al arrancar una toalla de papel o una bolsa de plástico de un rollo, ¿por qué es más efectivo un fuerte tirón que uno lento?
47. Si estás en un carro en reposo que es golpeado por atrás, puedes sufrir una seria lesión del cuello llamada latigazo. ¿Qué tiene que ver el latigazo con la primera ley de Newton?
48. En términos de la primera ley de Newton (la ley de la inercia), ¿cómo un reposacabezas te ayuda a protegerte contra el latigazo en una colisión trasera?
49. ¿Por qué sales lanzado hacia adelante en un autobús que frena súbitamente? ¿Por qué sales lanzado hacia atrás cuando toma rapidez? ¿Qué ley se aplica aquí?
50. Piensa en un par de fuerzas, una que tenga una magnitud de 20 N y la otra de una magnitud de 12 N. ¿Cuál es la mayor fuerza neta posible para estas dos fuerzas? ¿Cuál es la mínima fuerza neta posible?
51. Cuando cualquier objeto está en equilibrio mecánico, ¿qué sería correcto decir acerca de todas las fuerzas que actúan sobre él? ¿La fuerza neta necesariamente debe ser cero?
52. ¿Cuáles de las siguientes son cantidades escalares, cuáles son cantidades vectoriales y cuáles no son ninguna de ellas? (a) fuerza; (b) edad; (c) aceleración, y (d) temperatura.
53. ¿Qué sería correcto decir acerca de un par de vectores cuya suma es cero?
54. ¿Cuál es más probable que se rompa: una hamaca estirada firmemente entre un par de árboles o una que se pandea más cuando te sientas en ella?
55. Una pesada ave se posa en un tendedero. ¿La tensión en el tendedero será mayor si la cuerda se pandea mucho o si se pandea poco?
56. La soga sostiene una linterna que pesa 50 N. ¿La tensión en la soga es menor que, igual a o mayor que 50 N? Usa la regla del paralelogramo para defender tu respuesta.

57. Un mono cuelga inmóvil al final de una liana vertical. ¿Cuáles dos fuerzas actúan sobre el mono? Si una de ellas es mayor, ¿cuál es?
58. La soga del ejercicio 56 se coloca como se muestra y aun así sostiene la linterna de 50 N. ¿La tensión en la soga es menor que, igual a o mayor que 50 N? Usa la regla del paralelogramo para defender tu respuesta.

59. ¿Un objeto puede estar en equilibrio mecánico cuando sobre él actúa una sola fuerza distinta de cero? Explica.
60. Cuando una bola se lanza en línea recta hacia arriba, momentáneamente llega a detenerse en lo alto de su trayectoria. ¿Está en equilibrio durante este breve momento? ¿Por qué sí o por qué no?
61. Un disco de hockey se desliza por el hielo con una rapidez constante. ¿Está en equilibrio? ¿Por qué sí o por qué no?
62. Tu amiga se sienta en reposo sobre una silla. ¿Puedes decir que ninguna fuerza actúa sobre ella? ¿O es correcto decir que ninguna fuerza *neta* actúa sobre ella? Defiende tu respuesta.
63. Nellie Newton cuelga en reposo de los extremos de la soga que se muestra. ¿Cómo se compara la lectura de la báscula con su peso?

64. Harry el pintor se balancea año tras año en su guindola. Su peso es de 500 N y la soga tiene un punto de rotura de 300 N, que él desconoce. ¿Por qué la soga no se rompe cuando se sostiene como se muestra a la izquierda? Un día, Harry pinta cerca de un asta de bandera y, para cambiar, amarra el extremo libre de la soga al asta en lugar de a su silla, como se muestra a la derecha. ¿Por qué Harry termina tomando sus vacaciones más pronto?



65. Para el sistema de poleas que se muestra, ¿cuál es el límite superior de peso que puede levantar el hombre fuerte?

66. Si el hombre fuerte del ejercicio anterior ejerce una fuerza descendente de 800 N sobre la soga, ¿cuánta fuerza ascendente se ejerce sobre el cubo?
67. Una fuerza de gravedad jala hacia abajo sobre un libro que está en una mesa. ¿Qué fuerza impide que el libro acelere hacia abajo?

68. ¿Cuántas fuerzas significativas actúan sobre un libro en reposo en una mesa? Identifica las fuerzas.
69. Coloca un libro pesado sobre una mesa y la mesa empuja hacia arriba sobre el libro. ¿Por qué este empuje hacia arriba no hace que el libro se eleve de la mesa?
70. Cuando estás de pie sobre el piso, ¿el piso ejerce una fuerza hacia arriba contra tus pies? ¿Cuánta fuerza ejerce? ¿Por qué no te mueves hacia arriba por esta fuerza?
71. Supón que rebotas arriba y abajo mientras te pesas en una báscula de baño. ¿Qué varía: la fuerza de sostén ascendente o la fuerza de gravedad sobre ti? ¿Por qué la lectura de tu peso se muestra mejor cuando estás de pie en reposo sobre la báscula?
72. Un jarro vacío con peso W reposa sobre una mesa. ¿Cuál es la fuerza de sostén que ejerce la mesa sobre el jarro? ¿Cuál es la fuerza de sostén cuando se vierte agua con peso *w* en el jarro?
73. Si jalas horizontalmente una caja con una fuerza de 200 N, ésta se desliza por el piso con equilibrio dinámico. ¿Cuánta fricción actúa sobre la caja?
74. Con la finalidad de deslizar sobre el piso un pesado armario con rapidez constante, ejerces una fuerza horizontal de 600 N. ¿La fuerza de fricción entre el armario y el piso es mayor que, menor que o igual a 600 N? Defiende tu respuesta.
75. Piensa en una caja en reposo sobre el piso de una fábrica. Cuando un par de trabajadores comienzan a levantarla, ¿la fuerza de sostén sobre la caja proporcionada por el piso aumenta, disminuye o permanece igual? ¿Qué sucede con la fuerza de sostén sobre los pies de los trabajadores?
76. Dos personas jalan cada una con una fuerza de 300 N sobre una soga en un concurso de tirar la cuerda. ¿Cuál es la fuerza neta sobre la soga? ¿Cuánta fuerza ejerce la soga sobre cada persona?
77. Dos fuerzas actúan sobre un paracaidista que cae en el aire: la fuerza de gravedad y la resistencia del aire. Si la caída es constante, sin ganancia ni pérdida de rapidez, entonces el paracaidista está en equilibrio dinámico. ¿Cómo se comparan las magnitudes de la fuerza gravitacional y de la resistencia del aire?
78. Un niño aprende en la escuela que la Tierra viaja a más de 100,000 kilómetros por hora alrededor del Sol y, en un tono alarmado, pregunta por qué no sale disparado. ¿Cuál es tu explicación?

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

79. Para responder la pregunta "¿qué mantiene a la Tierra moviéndose alrededor del Sol?", un amigo afirma que la inercia la mantiene en movimiento. Discute y corrige la afirmación errónea de tu amigo.
80. Tu amigo dice que la inercia es una fuerza que mantiene las cosas en su lugar, ya sea en reposo o en movimiento. ¿Tú y tus compañeros de discusión están de acuerdo? ¿Por qué sí o por qué no?
81. Piensa en una pelota en reposo en medio de un vagón de juguete. Cuando el vagón se jala hacia adelante, la pelota rueda contra la parte trasera del vagón. Discute e interpreta esta observación en términos de la primera ley de Newton.
82. Supón que estás en un vehículo en movimiento y que el motor deja de funcionar. Pisas los frenos y frenas el vehículo hasta la mitad de su rapidez original . Si quitas tu pie de los frenos, ¿el vehículo acelerará un poco o seguirá con la mitad de la rapidez original y frenará debido a fricción? Defiende tu respuesta con tus compañeros de discusión.
83. Cuando empujas un carro, éste se mueve. Cuando dejas de empujar, llega al reposo. ¿Esto viola la ley de la inercia de Newton? Defiende tu respuesta.
84. Cada hueso en la cadena de huesos que forman tu columna vertebral está separado de sus vecinos por discos de tejido elástico. ¿Qué ocurre, entonces, cuando saltas fuertemente sobre tus pies desde una posición elevada? (*Sugerencia:* piensa en la cabeza de martillo de la Figura 2.5.) Discute por qué eres un poco más alto en la mañana que en la noche.
85. Comienza a rodar una bola por una pista de boliche y descubrirás que se mueve un poco más lento con el tiempo. ¿Esto viola la ley de la inercia de Newton? Defiende tu respuesta.
86. Considera la fuerza normal sobre un libro en reposo sobre una mesa. Si la mesa se inclina de modo que la superficie forme un plano inclinado, ¿la magnitud de la fuerza normal cambiará? Si es así, ¿cómo?
87. Cuando empujas hacia abajo sobre un libro en reposo que está sobre una mesa, sientes una fuerza hacia arriba. ¿Esta fuerza depende de la fricción? Discute y defiende tu respuesta.
88. Antes de la época de Galileo y Newton, algunos académicos ilustrados pensaban que una piedra soltada desde la punta de un alto mástil de un barco en movimiento caería verticalmente y golpearía la cubierta bajo el mástil a una distancia igual a cuánto se hubiera movido el barco hacia adelante mientras caía la piedra. A la luz de tu comprensión de la primera ley de Newton, ¿qué piensas de esto?
89. Puesto que la Tierra gira una vez cada 24 horas, la pared oeste de tu habitación se mueve en una dirección hacia ti con una rapidez lineal que probablemente es mayor a 1,000 kilómetros por hora (la rapidez exacta depende de tu latitud). Cuando estás de frente a la pared, eres transportado con la misma rapidez, de modo que no lo notas. Pero cuando saltas, y tus pies ya no están en contacto con el piso, ¿por qué no te golpea la pared a alta rapidez?
90. Si lanzas una moneda en línea recta hacia arriba mientras viajas en tren ¿dónde aterriza la moneda cuando el movimiento del tren es uniforme a lo largo de una vía en línea recta? ¿Y cuando el tren frena mientras la moneda está en el aire?
91. Discute y responde la pregunta anterior para el momento cuando el tren da vuelta en una curva.
92. La chimenea de un tren de juguete inmóvil consiste en un cañón de resorte vertical que dispara una bola de acero más o menos a un metro en línea recta al aire, tan recto que la bola siempre cae de vuelta en la chimenea. Supón que el tren se mueve con rapidez constante a lo largo de la vía recta. ¿Crees que la bola todavía regresará a la chimenea si se dispara desde el tren en movimiento? ¿Y si el tren gana rapidez a lo largo de la vía recta? ¿Y si se mueve con una rapidez constante en una vía circular? Discute por qué difieren tus respuestas.

3

CAPÍTULO 3

# Movimiento lineal


3.1 El movimiento es relativo

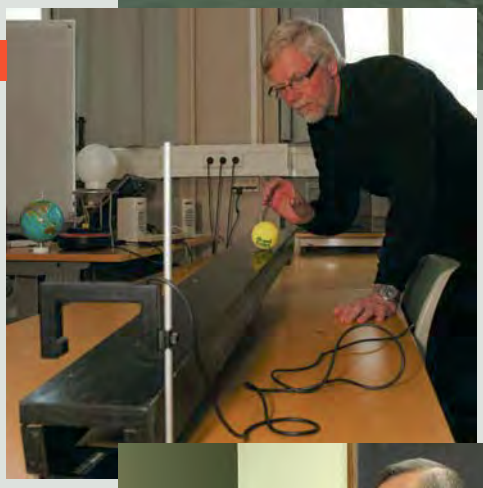
3.2 Rapidez

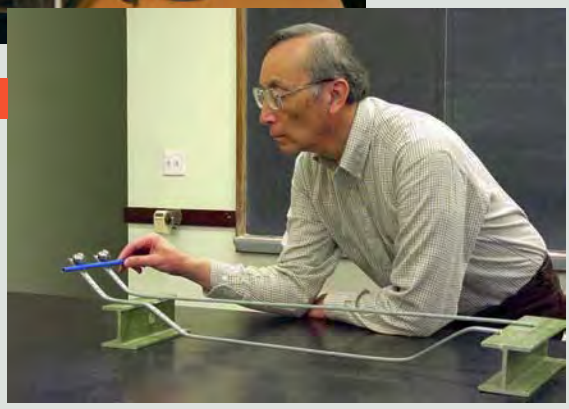
3.3 Velocidad

3.4 Aceleración

3.5 Caída libre

3.6 Vectores de velocidad

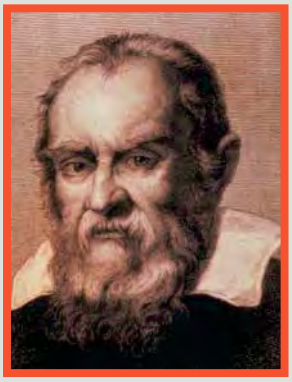




**1** Joan Lucas se mueve con rapidez creciente cuando aumenta la distancia que su caballo recorre a cada segundo. **2** Lo mismo ocurre con Sue Johnson (primer remero) y su equipo, quienes ganan medallas por gran rapidez en su bote. **3** Carl Angell, en la Universidad de Oslo, hace lo que Galileo hizo hace 400 años, pero con un sensor fotoeléctrico de compuerta (*photogate*) que mide la rapidez de la bola. **4** Chelcie Liu pide a sus alumnos que cotejen sus razonamientos con sus vecinos y predigan cuál bola llegará primero al final de las pistas con longitudes similares.

En este capítulo continuamos con las ideas de un hombre que fue sometido a arresto domiciliario por sus ideas, el científico italiano Galileo Galilei, quien murió el mismo año cuando nació Newton. Las ideas de Galileo serían los cimientos para Isaac Newton quien, cuando se le preguntó acerca del éxito que había alcanzado en ciencia, respondió que estaba apoyado sobre los hombros de gigantes. El más notable de ellos fue Galileo.

Galileo desarrolló un interés temprano por el movimiento y pronto entró en conflicto con sus contemporáneos, quienes apoyaban las ideas aristotélicas acerca de los cuerpos que caían y, por lo general, creían que el Sol giraba alrededor de la Tierra. Galileo dejó Pisa para dar clases en la Universidad de Padua y se convirtió en defensor de la nueva teoría copernicana del sistema solar. Fue el primer hombre en descubrir montañas en la Luna y en encontrar las lunas de Júpiter. Puesto que publicó sus descubrimientos en italiano, el idioma del pueblo, en lugar de hacerlo en latín, que era el idioma de los académicos, y debido a la reciente invención de la imprenta, sus ideas alcanzaron amplia difusión. Pronto se metió en problemas con la Iglesia y fue advertido de no enseñar ni apoyar las ideas copernicanas. Galileo se contuvo de hacer público su trabajo durante casi 15 años y después, con actitud desafiante, publicó sus observaciones y conclusiones, que eran contrarias a la doctrina de la Iglesia. El resultado fue un juicio en el que se le declaró culpable y se le obligó a renunciar a su descubrimiento de que la Tierra se movía. Se dice que, cuando salía de la corte, murmuró: "y, sin embargo, se mueve". Anciano para entonces, con la salud y el espíritu debilitados, Galileo fue sentenciado a arresto domiciliario perpetuo. No obstante, concluyó sus estudios acerca del movimiento, y sus escritos fueron sacados de contrabando de Italia y publicados en Holanda. Sus ideas sobre el movimiento son el tema de este capítulo.



## 3.1 El movimiento es relativo

**FIGURA 3.1**
Cuando te sientas en una silla, tu rapidez es cero en relación con la Tierra, pero es de 30 km/s en relación con el Sol.

Todo se mueve, incluso las cosas que parecen estar en reposo. Se mueven en relación con el Sol y las estrellas. Mientras lees esto, te mueves a aproximadamente 107,000 kilómetros por hora en relación con el Sol, y te mueves incluso más rápido en relación con el centro de la galaxia. Cuando se estudia el movimiento de algo, se describe el movimiento en relación con algo más. Si caminas por el pasillo de un autobús en movimiento, es probable que tu rapidez en relación con el suelo del autobús sea muy diferente de tu rapidez en relación con el camino. Cuando se dice que un automóvil de carreras alcanza una rapidez de 300 kilómetros por hora, se entiende que es en relación con la pista. A menos que se diga de otra manera, cuando se estudian las rapideces de las cosas en el entorno, se entiende que es en relación con la superficie de la Tierra. El movimiento es relativo.

Si miras por la ventana de un avión y observas a otro avión volar con la misma rapidez en la dirección opuesta, lo verás volar el doble de rápido, lo que ilustra bastante bien el movimiento relativo.

**PUNTO DE CONTROL**

**Un mosquito hambriento te ve descansar en una hamaca en una brisa de 3 m/s. ¿Qué tan rápido y en qué dirección debe volar el mosquito para poder flotar sobre ti y almorzar?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

El mosquito debe volar hacia ti en la brisa. Cuando esté justo sobre ti, debe volar a 3 m/s para flotar en reposo. A menos que su agarre sobre tu piel sea suficientemente fuerte después de aterrizar, debe seguir volando a 3 m/s para evitar ser arrastrado por el viento. Es por eso que la brisa impide de manera efectiva las picaduras de mosquitos.

# 3.2 Rapidez

Antes de la época de Galileo, las personas describían el movimiento de las cosas simplemente como "lento" o "rápido". Tales descripciones eran vagas. Se le atribuye a Galileo el mérito de ser el primero en medir la rapidez al considerar la distancia recorrida y el tiempo que tarda. Definió la **rapidez** como la distancia recorrida por unidad de tiempo.

$$\text{Rapidez} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$$

Un ciclista que recorre 16 metros en un tiempo de 2 segundos, por ejemplo, tiene una rapidez de 8 metros por segundo. Es interesante mencionar que Galileo podía medir distancias fácilmente, pero en su época medir tiempos cortos no era asunto sencillo. En algunas ocasiones usó su propio pulso y en otras, utilizó el conteo de gotas que caían de un "reloj acuático" que él mismo diseñó.

Cualquier combinación de unidades de distancia y de tiempo es válida para medir la rapidez; para vehículos de motor (o distancias largas), por lo general se usan las unidades de kilómetros por hora (km/h) o millas por hora (mi/h o mph). Para distancias más cortas es más útil metros por segundo (m/s). La diagonal (/) se lee *por* y significa "dividido entre".* En todo el libro se usarán principalmente metros por segundo (m/s). La tabla 3.1 muestra algunas rapideces aproximadas en diferentes unidades.[1]

## Rapidez instantánea

Las cosas en movimiento con frecuencia tienen variaciones en su rapidez. Un automóvil, por ejemplo, puede viajar por una calle a 50 km/h, frenar hasta 0 km/h en una luz roja y acelerar a sólo a 30 km/h debido al tráfico. Puedes decir la rapidez del automóvil en cualquier instante si observas su velocímetro.** La rapidez en cualquier instante es la **rapidez instantánea**. Un automóvil que viaja a 50 km/h por lo general va a tal rapidez durante menos de 1 hora. Si efectivamente viajara a dicha rapidez por toda 1 hora, recorrería 50 km. Si continuara con dicha rapidez durante media hora, recorrería la mitad de esa distancia: 25 km. Si continuara sólo por 1 minuto, recorrería menos de 1 km.

## Rapidez promedio

Cuando planea un viaje en automóvil, el conductor con frecuencia quiere conocer el tiempo de recorrido. El conductor se preocupa por la **rapidez promedio** del viaje.

$$\text{Rapidez promedio} = \frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

La rapidez promedio puede calcularse de manera muy sencilla. Por ejemplo, si conduces una distancia de 80 kilómetros en un tiempo de 1 hora, se dice que la rapidez promedio es de 80 kilómetros por hora. Del mismo modo, si recorres 320 kilómetros en 4 horas,

$$\text{Rapidez promedio} = \frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{320\,\text{km}}{4\,\text{h}} = 80\,\text{km/h}$$

Se observa que, cuando una distancia en kilómetros (km) se divide entre un tiempo en horas (h), la respuesta está en kilómetros por hora (km/h).

Dado que la rapidez promedio es la distancia recorrida dividida entre el tiempo total de viaje, no indica las diferentes rapideces y variaciones que pudieron ocurrir durante intervalos de tiempo más cortos. En la mayor parte de los viajes se experimentan varias rapideces, de modo que la rapidez promedio con frecuencia es muy diferente de la rapidez instantánea en cualquier momento particular.

*N.T. En castellano la diagonal (/) también se lee "sobre" y también significa "dividido entre".
**N.T. Aunque acaso el nombre correcto debería ser *rapidómetro*, porque el dispositivo sólo indica la *magnitud*, no la *dirección*.
[1]La conversión se basa en 1 h = 3,600 s, 1 mi = 1,609.344 m.

**VIDEO: Definición de rapidez**

**TABLA 3.1 RAPIDECES APROXIMADAS EN DIFERENTES UNIDADES**

| |
|---|
| 5 m/s = 11 mi/h = 18 km/h |
| 10 m/s = 22 mi/h = 36 km/h |
| 20 m/s = 45 mi/h = 72 km/h |
| 30 m/s = 67 mi/h = 107 km/h |
| 40 m/s = 89 mi/h = 142 km/h |
| 50 m/s = 112 mi/h = 180 km/h |

**FIGURA 3.2**
Un velocímetro que da lecturas tanto en millas por hora como en kilómetros por hora.

**SCREENCAST: Definiciones de movimiento lineal**

**VIDEO: Rapidez promedio**

Si te levantan una infracción por exceso de rapidez, ¿qué escribe el oficial de policía en tu infracción: tu *rapidez instantánea* o tu *rapidez promedio*?

Si conoces la rapidez promedio y el tiempo de viaje, la distancia recorrida se encuentra fácilmente. Un simple reordenamiento de la definición da

Distancia total recorrida = rapidez promedio × intervalo de tiempo

Si tu rapidez promedio es de 80 kilómetros por hora en un viaje de 4 horas, por ejemplo, recorres una distancia de 320 kilómetros (80 km/h × 4 h).

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Cuál es la rapidez promedio de un guepardo que recorre 100 metros en 4 segundos? ¿Si recorre 50 m en 2 s?**
2. **Si un automóvil se mueve con una rapidez promedio de 60 km/h durante una hora, recorrerá una distancia de 60 km.**
   **a. ¿Cuánto recorrerá si se mueve a esta tasa durante 4 h?**
   **b. ¿Durante 10 h?**
3. **Además del velocímetro en el tablero de todo automóvil, hay un odómetro, que registra la distancia recorrida. Si la lectura inicial se pone en cero al inicio de un viaje y la lectura es de 40 km media hora después, ¿cuál fue tu rapidez promedio?**
4. **¿Sería posible lograr esta rapidez promedio y nunca ir más rápido que 80 km/h?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

*(¿Estás leyendo esto antes de haber razonado tus respuestas en tu mente? Como se mencionó en el Capítulo 2, cuando encuentres preguntas de Punto de control a lo largo de este libro, comprueba tu **razonamiento** antes de leer las respuestas. No sólo aprenderás más, también disfrutarás más el aprendizaje.)*

1. En ambos casos la respuesta es 25 m/s:

$$\text{Rapidez promedio} = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{100 \text{ metros}}{4 \text{ segundos}} = \frac{50 \text{ metros}}{2 \text{ segundos}} = 25 \text{ m/s}$$

2. La distancia recorrida es la rapidez promedio × tiempo de viaje, de modo que
   **a.** Distancia = 60 km/h × 4 h = 240 km
   **b.** Distancia = 60 km/h × 10 h = 600 km

3. $\text{Rapidez promedio} = \frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{40 \text{ km}}{0.5 \text{ h}} = 80 \text{ km/h}$

4. No, no si el viaje comienza desde el reposo. Hay momentos en los que las rapideces instantáneas son menores a 80 km/h, de modo que el conductor debe conducir a rapideces de más de 80 km/h durante uno o más intervalos de tiempo para poder promediar 80 km/h. En la práctica, las rapideces promedio suelen ser mucho menores que las rapideces instantáneas mucho más altas.

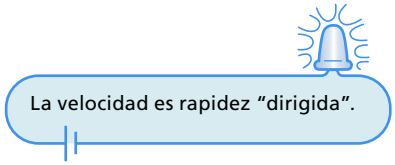
**VIDEO: Velocidad**

**VIDEO: Velocidad variable**

## 3.3 Velocidad

Cuando se conoce tanto la rapidez como la dirección de movimiento de un objeto, se conoce su **velocidad**. La velocidad combina las ideas de rapidez y dirección de movimiento. Por ejemplo, si un automóvil viaja a 60 km/h, se conoce su rapidez. Pero si se dice que el automóvil se mueve a 60 km/h hacia el norte, se especifica su *velocidad*. La rapidez es una descripción de qué tan rápido; la velocidad es qué tan rápido *y* en qué dirección. Una cantidad como la velocidad, que especifica tanto dirección como magnitud, se llama **cantidad vectorial**. Recuerda del Capítulo 2 que la fuerza es una cantidad vectorial, que necesita tanto magnitud como dirección para su descripción.

Del mismo modo, la velocidad es una cantidad vectorial. Por el contrario, una cantidad que sólo requiere magnitud para su descripción se llama **cantidad escalar**. La rapidez es una cantidad escalar.




## Velocidad constante

Rapidez constante significa una rapidez que no cambia. Algo con rapidez constante no acelera ni frena. La velocidad constante, por otra parte, significa *tanto* rapidez constante *como* dirección constante. La dirección constante es una línea recta: la trayectoria del objeto no se curva. De modo que velocidad constante significa movimiento en línea recta con rapidez constante.

## Velocidad variable

Si cambian o la rapidez o la dirección (o si cambian ambos), entonces la velocidad cambia. Un automóvil en una pista curva, por ejemplo, puede tener una rapidez constante pero, dado que su dirección cambia, su velocidad no es constante. En la siguiente sección se verá que *acelera*.

**FIGURA 3.3**
El automóvil en la pista circular puede tener una rapidez constante, pero su velocidad cambia a cada instante. ¿Por qué?

**PUNTO DE CONTROL**

1. **"Ella viaja con una rapidez constante en una dirección constante." Parafrasea la misma oración con menos palabras.**
2. **El velocímetro de un automóvil que se mueve hacia el este indica 100 km/h. Pasa a otro automóvil que se mueve hacia el oeste a 100 km/h. ¿Ambos automóviles tienen la misma rapidez? ¿Tienen la misma velocidad?**
3. **Durante cierto periodo, el velocímetro de un automóvil lee una constante de 60 km/h. ¿Esto indica una rapidez constante? ¿Una velocidad constante?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. "Ella se mueve con velocidad constante."
2. Ambos automóviles tienen la misma rapidez, pero tienen velocidades opuestas porque se mueven en direcciones opuestas.
3. La lectura constante del velocímetro indica una rapidez constante mas no una velocidad constante, porque el automóvil puede no estarse moviendo en una trayectoria en línea recta, en cuyo caso está acelerando.

**SCREENCAST: El problema de las bicicletas y las abejas**

**SCREENCAST: Conversión de unidades**

# 3.4 Aceleración

Tú puedes cambiar la velocidad de algo si cambias su rapidez, si cambias su dirección o si cambias *tanto* su rapidez *como* su dirección. Qué tan rápidamente y en qué dirección cambia la velocidad es **aceleración**:[2]

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

Uno está familiarizado con la aceleración de un automóvil. Cuando el conductor pisa el pedal de combustible (llamado adecuadamente "acelerador"), los pasajeros experimentan

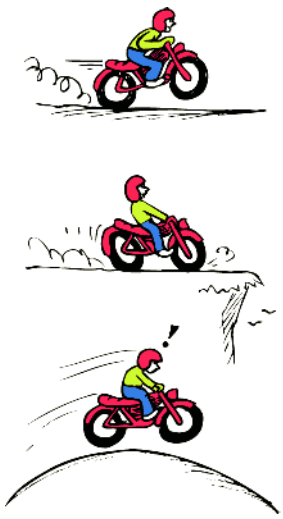


**FIGURA 3.4**
Se dice que un cuerpo experimenta aceleración cuando su velocidad cambia.

[2]Las frases "cambio en" y "diferencia en" pueden representarse con la letra griega delta, Δ. Entonces la aceleración se puede expresar como $\frac{\Delta v}{\Delta t}$, donde $\Delta v$ es el cambio en velocidad y $\Delta t$ es el cambio correspondiente en tiempo. La expresión proporciona la *aceleración promedio*. La mayor parte de los movimientos acelerados que se tratan en este libro serán de aceleración constante.

**VIDEO: Definición de aceleración**

**VIDEO: Ejemplo numérico de aceleración**

aceleración (o "acelerones", como a veces se les llama) conforme se presionan contra sus asientos. La idea clave que define la aceleración es el *cambio.* Supón que conduces y, en 1 segundo, aumentas de manera estable tu velocidad de 30 kilómetros por hora a 35 kilómetros por hora, y luego a 40 kilómetros por hora el segundo siguiente, a 45 en el siguiente segundo, y así por el estilo. Cambias la velocidad 5 kilómetros por hora cada segundo. Este cambio de velocidad es lo que se entiende por aceleración.

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{5\,\text{km/h}}{1\,\text{s}} = 5\,\text{km/h}\cdot\text{s}$$

En este caso, la aceleración es 5 kilómetros por hora segundo (abreviado 5 km/h · s), en la dirección hacia adelante. Observa que una unidad de tiempo entra dos veces: una vez para la unidad de velocidad y de nuevo para el intervalo de tiempo en el que cambia la velocidad. Observa también que la aceleración no sólo es el cambio total de velocidad; es la *tasa de cambio en el tiempo,* o el *cambio por segundo*, en velocidad.

**FIGURA 3.5**
La desaceleración rápida la siente el conductor, quien da un tumbo hacia adelante (de acuerdo con la primera ley de Newton).

## PUNTO DE CONTROL

1. **Un automóvil determinado puede ir desde el reposo hasta 90 km/h en 10 s. ¿Cuál es su aceleración?**
2. **En 2.5 s, un automóvil aumenta su rapidez de 60 a 65 km/h en tanto que una bicicleta va del reposo a 5 km/h. ¿Cuál experimenta la mayor aceleración? ¿Cuál es la aceleración de cada uno?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La aceleración es 9 km/h · s. Hablando estrictamente, esta sería su aceleración promedio, pues puede haber cierta variación en su tasa para adquirir rapidez.
2. Las aceleraciones tanto del automóvil como de la bicicleta son iguales: 2 km/h · s.

$$\text{Aceleración}_{\text{automóvil}} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{65\ \text{km/h} - 60\ \text{km/h}}{2.5\ \text{s}} = \frac{5\ \text{km/h}}{2.5\ \text{s}} = 2\ \text{km/h}\cdot\text{s}$$

$$\text{Aceleración}_{\text{bicicleta}} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{5\ \text{km/h} - 0\ \text{km/h}}{2.5\ \text{s}} = \frac{5\ \text{km/h}}{2.5\ \text{s}} = 2\ \text{km/h}\cdot\text{s}$$

Aunque las velocidades son muy diferentes, las tasas de *cambio* de velocidad son las mismas. Por tanto, las aceleraciones son iguales.

¿Puedes ver que un automóvil tiene tres controles que cambian la velocidad: el pedal de combustible (acelerador), los frenos y el volante?

El término *aceleración* se aplica tanto para reducciones como para aumentos de velocidad. Se dice que los frenos de un automóvil, por ejemplo, producen grandes aceleraciones retardadoras; esto es: hay una gran reducción por segundo en la velocidad del automóvil. Con frecuencia a esto se le llama *desaceleración.* La desaceleración se experimenta cuando el conductor de un autobús o un automóvil aplica los frenos y uno tiende a dar un tumbo hacia adelante.

Uno acelera siempre que avanza sobre una trayectoria curva, incluso si se mueve con rapidez constante, porque la dirección cambia cada instante; en consecuencia, la velocidad cambia. Por esta razón se distinguen rapidez y velocidad, y la *aceleración* se define como la tasa a la que cambia la velocidad, lo que en consecuencia abarca cambios tanto de rapidez como de dirección.

Quienquiera que haya estado de pie en un autobús atiborrado de gente habrá experimentado la diferencia entre velocidad y aceleración. Excepto por los efectos de un camino con baches, puedes ponerte de pie sin esfuerzo adicional dentro de un autobús que se mueve con velocidad constante, sin importar qué tan rápido vaya. Puedes lanzar una moneda y atraparla exactamente como si el autobús estuviera en reposo. Sólo cuando el autobús acelera (adquiere rapidez, frena o da vuelta) experimentas dificultad para ponerte de pie.

En gran parte de este libro sólo se abordará el movimiento a lo largo de una línea recta. Cuando se considera el movimiento en línea recta en un sentido, es común usar los términos *rapidez* y *velocidad* de manera indistinta. Cuando la dirección no cambia, la aceleración puede expresarse como la tasa a la que cambia la *rapidez*.

$$\text{Aceleración (a lo largo de una línea recta)} = \frac{\text{cambio de rapidez}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Cuál es la aceleración de un automóvil de carreras que te rebasa zumbando con una velocidad constante de 400 km/h?**
2. **¿Cuál tiene mayor aceleración: un avión que pasa de 1,000 km/h a 1,005 km/h en 10 segundos, o un patinador que pasa de cero a 5 km/h en 1 segundo?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Cero, porque su velocidad no cambia.
2. Ambos ganan 5 km/h, pero el patinador lo hace en un décimo del tiempo. Por tanto, el patinador tiene mayor aceleración; de hecho, 10 veces mayor. Un poco de cálculo mostrará que la aceleración del avión es 0.5 km/h·s, en tanto que la aceleración del patinador, que se mueve más lento, es de 5 km/h·s. Velocidad y aceleración son conceptos muy diferentes. Distinguirlos es muy importante.

## Aceleración sobre los planos inclinados de Galileo

Galileo creó el concepto de aceleración en sus experimentos sobre planos inclinados. Su principal interés eran los objetos en caída, y, puesto que carecía de dispositivos de cronometrado exacto, usó planos inclinados de manera efectiva para frenar el movimiento acelerado e investigarlo más cuidadosamente.

Galileo descubrió que una bola que rueda hacia abajo sobre un plano inclinado adquiere la misma cantidad de rapidez en segundos sucesivos; esto es, la bola rueda con aceleración invariable: aceleración constante. Por ejemplo, puede observarse que una bola que rueda hacia abajo sobre un plano inclinado en cierto ángulo adquiere una rapidez de 2 metros por segundo por cada segundo que rueda. Este aumento por segundo es su aceleración. Su velocidad instantánea a intervalos de 1 segundo, con esta aceleración, es entonces 0, 2, 4, 6, 8, 10, etc., metros por segundo. Puedes ver que la rapidez instantánea o velocidad de la bola en cualquier momento dado después de soltarla del reposo es simplemente igual a su aceleración multiplicada por el tiempo:[3]

$$\text{Velocidad adquirida} = \text{aceleración} \times \text{tiempo}$$

Si sustituyes la aceleración de la bola en esta relación (2 metros por segundo al cuadrado), puedes ver que, al final de 1 segundo, la bola viaja a 2 metros por segundo; al final de 2 segundos, viaja a 4 metros por segundo; al final de 10 segundos, viaja a 20 metros por segundo; etc. La rapidez o velocidad instantánea en cualquier momento es igual a la aceleración multiplicada por el número de segundos que ha acelerado.

[3]Observa que esta relación se deriva de la definición de aceleración. Para una bola que parte del reposo, $a = \Delta v/\Delta t$ puede escribirse como $a = v/t$, que luego puede reordenarse (al multiplicar ambos lados de la ecuación por $t$) como $v = at$.

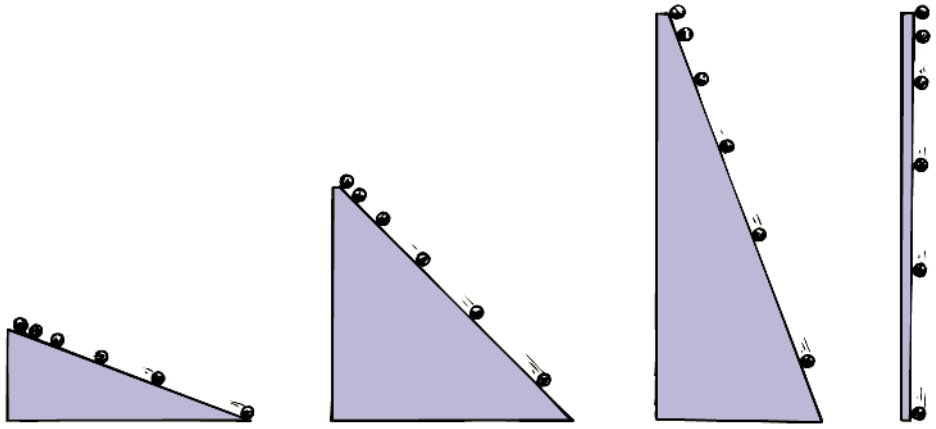


**FIGURA 3.6**
Cuanto mayor sea la pendiente del plano inclinado, mayor será la aceleración de la bola. ¿Cuál es la aceleración de la bola si cae verticalmente?

Qué bien: la aceleración de la gravedad es 10 m/s cada segundo todo el tiempo. ¿Por qué esto es así, para cualquier masa?, lo sabrás en el Capítulo 4.

Galileo descubrió que las aceleraciones en cada plano inclinado eran constantes por cada inclinación; las más grandes eran para los planos más inclinados. La bola alcanza su máxima aceleración cuando el plano se pone verticalmente. Entonces cae con la aceleración de un objeto en caída (Figura 3.6). Sin importar el peso o el tamaño del objeto, Galileo descubrió que, cuando la resistencia del aire es suficientemente pequeña como para despreciarse, todos los objetos caen con la misma aceleración invariable.

## 3.5 Caída libre

### Qué tan rápido

**SCREENCAST: Caída libre**

Las cosas caen debido a la fuerza de gravedad. Cuando un objeto que cae está libre de toda restricción (ninguna fricción, con el aire o de otra índole) y cae bajo la influencia de la gravedad sola, el objeto está en un estado de **caída libre**. (En el Capítulo 4 se considerarán los efectos de la resistencia del aire sobre los objetos en caída.) La Tabla 3.2 muestra las rapideces instantáneas de un objeto en caída libre a intervalos de un segundo. Lo importante que se debe observar en estos números es la forma en la que cambia la rapidez. *Durante cada segundo de caída, el objeto gana una rapidez de 10 metros por segundo.* Esta ganancia por segundo es la aceleración. La aceleración de caída libre es aproximadamente igual a 10 metros por segundo cada segundo, o, en notación abreviada, 10 m/s$^2$ (que se lee como 10 metros por segundo al cuadrado). Observa que la unidad de tiempo, el segundo, entra dos veces: una vez para la unidad de rapidez y de nuevo para el intervalo de tiempo durante el cual cambia la rapidez.

En el caso de objetos en caída libre se acostumbra usar la letra $g$ para representar la aceleración (porque la aceleración es debida a la *gravedad*). El valor de $g$ es muy diferente sobre la superficie de la Luna y sobre las superficies de otros planetas. Aquí, sobre la Tierra, $g$ varía un poco en diferentes ubicaciones, con un valor promedio igual a 9.8 metros por segundo cada segundo o, en notación abreviada, 9.8 m/s$^2$. Aquí y en la Tabla 3.2 se redondea a 10 m/s$^2$ para que las ideas se comprendan mejor; los múltiplos de 10 son más claros que los múltiplos de 9.8. Donde las cifras exactas sean importantes, deberá usarse el valor de 9.8 m/s$^2$.

**TABLA 3.2 CAÍDA LIBRE DESDE EL REPOSO**

| Tiempo de caída (segundos) | Velocidad adquirida (metros/segundo) |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 1 | 10 |
| 2 | 20 |
| 3 | 30 |
| 4 | 40 |
| 5 | 50 |
| . | . |
| . | . |
| . | . |
| $t$ | $10t$ |

Observa en la Tabla 3.2 que la rapidez o velocidad instantánea de un objeto que cae desde el reposo coincide con la ecuación que Galileo dedujo con sus planos inclinados:

$$\text{Velocidad adquirida} = \text{aceleración} \times \text{tiempo}$$

La velocidad instantánea $v$ de un objeto que cae desde el reposo[4] después de un tiempo $t$ puede expresarse en notación abreviada como

$$v = gt$$

[4]Si, en lugar de soltarse desde el reposo, el objeto se lanza hacia abajo con una rapidez $v_0$, la rapidez $v$ después de cualquier tiempo transcurrido es $v = v_0 + at = v_0 - gt$, con la dirección positiva hacia arriba.

Para ver que esta ecuación tiene perfecto sentido, tómate un momento para verificarla con la Tabla 3.2. Observa que la velocidad o rapidez instantánea en metros por segundo es simplemente la aceleración $g = 10$ m/s$^2$ multiplicada por el tiempo $t$ en segundos.

La aceleración de caída libre es más clara cuando se consideran objetos que caen equipados con un velocímetro (Figura 3.7). Supón que una roca se suelta desde un alto risco y tú la observas con un telescopio. Si enfocaras el telescopio sobre el velocímetro, observarías que la rapidez crece con el tiempo. ¿Cuánto aumenta? La respuesta es: 10 m/s cada segundo sucesivo.

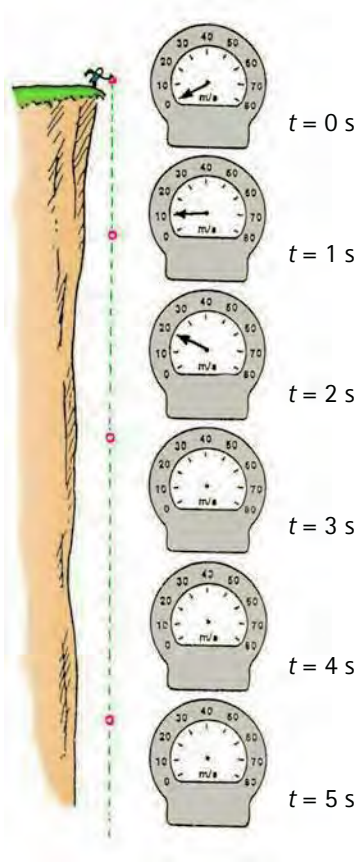



**FIGURA 3.7**
Imagina que una roca que cae está equipada con un velocímetro. En cada segundo sucesivo de caída, observarías que la rapidez de la roca aumenta en la misma cantidad: 10 m/s. Dibuja la aguja del velocímetro que falta en $t = 3$ s, 4 s y 5 s. (La Tabla 3.2 muestra las rapideces que leerías en varios segundos de caída.)

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Cuál sería la lectura en el velocímetro de la roca que cae en la Figura 3.7, 5 s después de que se suelta desde el reposo? ¿Y 6 s después de que se suelta? ¿6.5 s después de soltarla?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Las lecturas del velocímetro serían 50 m/s, 60 m/s y 65 m/s, respectivamente. Puedes razonar esto a partir de la Tabla 3.2 o usar la ecuación $v = gt$, donde $g$ es 10 m/s$^2$.

Hasta el momento se han considerado objetos que se mueven en línea recta hacia abajo en la dirección del jalón de la gravedad. ¿Y qué hay de los objetos lanzados de manera recta hacia arriba? Una vez soltados, siguen moviéndose hacia arriba durante algún tiempo y luego regresan hacia abajo. En el punto más alto del movimiento del objeto, cuando cambia su dirección de arriba hacia abajo, su rapidez instantánea es cero. Entonces comienza a bajar *como si se hubiera soltado desde el reposo en dicha altura.*

Durante la parte ascendente de este movimiento, el objeto frena a medida que sube. No debe sorprenderte que frene a la tasa de 10 metros por segundo cada segundo, la misma aceleración que experimenta en su camino hacia abajo. De modo que, como muestra la Figura 3.8, la rapidez instantánea en puntos de igual elevación en la trayectoria es la misma ya sea que el objeto se mueva hacia arriba o hacia abajo. Desde luego, las velocidades son opuestas, porque están en direcciones opuestas. Observa que las velocidades descendentes tienen un signo negativo, que indica la dirección descendente (se acostumbra llamar positivo *arriba* y negativo *abajo*). Ya sea que el objeto se mueva hacia arriba o hacia abajo, su aceleración es 10 m/s$^2$ todo el tiempo.

**PUNTO DE CONTROL**

**Una bola es lanzada recto hacia arriba y abandona tu mano a 20 m/s. ¿Qué predicciones puedes hacer acerca de la bola? (Por favor, ¡piénsalo *antes* de leer las predicciones sugeridas!)**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Existen varias. Una predicción es que la bola frenará a 10 m/s 1 segundo después de abandonar tu mano y llegará a un alto momentáneo 2 segundos después de abandonarla, cuando llegue al pico de su trayectoria. Esto se debe a que pierde 10 m/s cada segundo al subir. Otra predicción es que 1 segundo después, 3 segundos en total, se moverá hacia abajo a 10 m/s. En otro segundo, regresará a su punto de partida y se moverá a 20 m/s. De modo que el tiempo de cada ruta es 2 segundos, y su tiempo total en vuelo es de 4 segundos. Ahora verás cuánta distancia recorre hacia arriba y hacia abajo.

**VIDEO: Caída libre: ¿qué tan rápido?**

**VIDEO: $v = gt$**

**VIDEO: Caída libre: ¿cuánto recorre?**

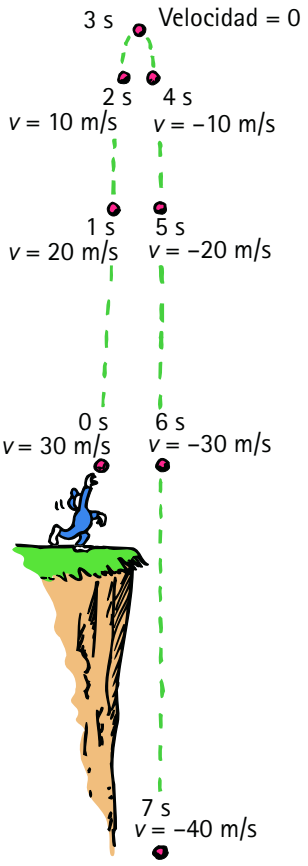



**FIGURA 3.8**
La tasa a la que cambia la velocidad cada segundo es la misma.

## Qué tan lejos

La distancia que *recorre* un objeto que cae es completamente diferente a qué tan *rápido* cae. Con sus planos inclinados, Galileo descubrió que la distancia que recorre un objeto que acelera de manera uniforme es proporcional al *cuadrado del tiempo.* La distancia recorrida por un objeto que acelera de manera uniforme y parte del reposo es:

$$\text{Distancia recorrida} = \frac{1}{2}(\text{aceleración} \times \text{tiempo} \times \text{tiempo})$$

Esta relación se aplica a la distancia de algo que cae. Se puede expresar, para el caso de un objeto que cae libremente, en notación abreviada como:

$$d = \frac{1}{2}gt^2$$

donde $d$ es la distancia que un objeto cae cuando el tiempo de caída en segundos se sustituye por $t$ y se eleva al cuadrado.[5] Si usas 10 m/s$^2$ para el valor de $g$, la distancia que cae en varios tiempos será como se muestra en la Tabla 3.3.

Observa que un objeto cae una distancia de sólo 5 metros durante el primer segundo de caída, aunque su rapidez entonces sea de 10 metros por segundo. Esto puede ser confuso, porque puedes pensar que el objeto debe caer una distancia de 10 metros. Pero para que caiga 10 metros en su primer segundo de caída, debería caer con una rapidez *promedio* de 10 metros por segundo durante todo el segundo. Comienza su caída a 0 metros por segundo, y su rapidez es de 10 metros por segundo sólo en el último instante del intervalo de 1 segundo. Su rapidez promedio durante este intervalo es el promedio de sus rapideces inicial y final, 0 y 10 metros por segundo. Para encontrar el valor promedio de éstos o cualesquiera dos números, simplemente suma los dos números y divide el total entre 2. Esto es igual a 5 metros por segundo, que, en el transcurso del intervalo de tiempo de 1 segundo, da una distancia de 5 metros. A medida que el objeto siga cayendo en segundos sucesivos, caerá distancias que irán creciendo, porque su rapidez aumenta de manera continua.

**TABLA 3.3 DISTANCIA RECORRIDA EN CAÍDA LIBRE**

| Tiempo de caída (segundos) | Distancia que cae (metros) |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 1 | 5 |
| 2 | 20 |
| 3 | 45 |
| 4 | 80 |
| 5 | 125 |
| . | . |
| . | . |
| . | . |
| $t$ | $10t^2$ |

### PUNTO DE CONTROL

**Un gato baja de una repisa y cae al suelo en 1/2 segundo.**

**a. ¿Cuál es su rapidez al golpear el suelo?**
**b. ¿Cuál es su rapidez promedio durante el 1/2 segundo?**
**c. ¿Cuán alta está la repisa del suelo?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

**a.** Rapidez: $v = gt = 10\ \text{m/s}^2 \times 1/2\ \text{s} = 5\ \text{m/s}$

**b.** Rapidez promedio: $\bar{v} = \dfrac{v\ \text{inicial} + v\ \text{final}}{2} = \dfrac{0\ \text{m/s} + 5\ \text{m/s}}{2} = 2.5\ \text{m/s}$

Para denotar rapidez promedio, se coloca una barra sobre el símbolo: $\bar{v}$

**c.** Distancia: $d = \bar{v}t = 2.5\ \text{m/s} \times 1/2\ \text{s} = 1.25\ \text{m}$

O, de manera equivalente,

$$d = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2} \times 10\ \text{m/s}^2 \times \left(\tfrac{1}{2}\text{s}\right)^2 = 1.25\ \text{m}$$

Observa que es posible encontrar la distancia a partir de cualquiera de estas relaciones equivalentes.

[5]Distancia que cae desde el reposo: $d = \text{velocidad promedio} \times \text{tiempo}$

$$d = \frac{\text{velocidad inicial} + \text{velocidad final}}{2} \times \text{tiempo}$$

$$d = \frac{0 + gt}{2} \times t$$

$$d = \frac{1}{2}gt^2$$

(Consulta el Apéndice B para más explicación.)

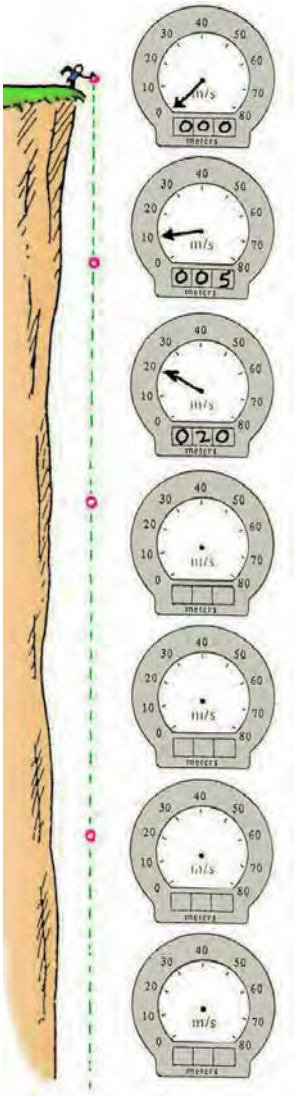



**FIGURA 3.9**
Imagina que una roca que cae está equipada con un velocímetro y un odómetro. Cada segundo, las lecturas de la rapidez aumentan en 10 m/s y las lecturas de distancia en $1/2\ gt^2$. ¿Puedes completar las lecturas de las posiciones del velocímetro y el odómetro?

**VIDEO: Resistencia del aire y objetos que caen**

**VIDEO: Distancia de caída**

Es frecuente observar que muchos objetos caen con aceleraciones desiguales. Una hoja de árbol, una pluma o una hoja de papel pueden revolotear en su camino al suelo lentamente. Se puede demostrar muy bien que estas aceleraciones tan diferentes se deben a la resistencia del aire, con un tubo de vidrio cerrado que contenga objetos ligeros y pesados: una pluma y una moneda, por ejemplo. En presencia de aire, la pluma y la moneda caen con aceleraciones muy diferentes. Pero, si se saca el aire del tubo mediante una bomba de vacío y el tubo se voltea rápidamente, la pluma y la moneda caen con la misma aceleración (Figura 3.10). Aunque la resistencia del aire altera de manera considerable el movimiento de las cosas, como las plumas que caen, el movimiento de los objetos más pesados, como las piedras y las pelotas de béisbol, a rapideces bajas ordinarias, no se modifican mucho por el aire. Las relaciones $v = gt$ y $d = 1/2\ gt^2$ pueden servir para obtener una muy buena aproximación en casi todos los objetos que caen en aire desde una posición inicial de reposo.

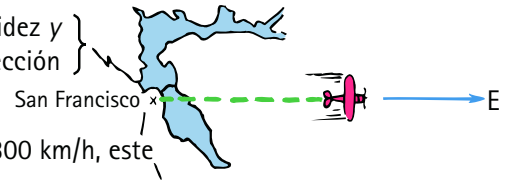
**FIGURA 3.10**
Una pluma y una moneda caen con iguales aceleraciones en un vacío.

$$\text{Rapidez} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$$

Tiempo = 1 hora

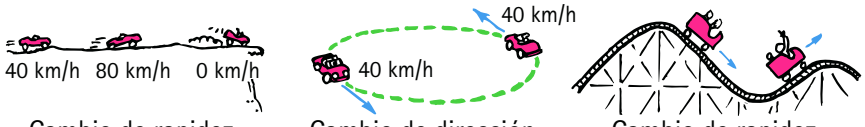
$$\text{Rapidez} = \frac{80\ \text{km}}{1\ \text{h}} = 80\ \text{km/h}$$

$$\text{Velocidad} = \left\{\begin{array}{c}\text{rapidez } y \\ \text{dirección}\end{array}\right\}$$




Velocidad = 300 km/h, este

$$\text{Aceleración} = \left\{\begin{array}{c}\text{tasa de} \\ \text{cambio de} \\ \text{velocidad}\end{array}\right\} \textit{debida a} \left\{\begin{array}{c}\text{cambio de rapidez} \\ \text{y/o dirección}\end{array}\right\}$$

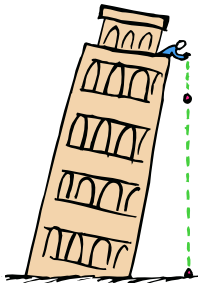



Cambio de rapidez, pero *no* de dirección

Cambio de dirección, pero *no* de rapidez

Cambio de rapidez *y* de dirección

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{tiempo}}$$



Tiempo = 0, velocidad = 0

Tiempo = 1 s, velocidad = 10 m/s

Tiempo = 2 s, velocidad = 20 m/s

$$\text{Aceleración} = \frac{20\ \text{m/s}}{2\ \text{s}}$$

$$a = 10\ \frac{\text{m/s}}{\text{s}}$$

$$a = 10\ \text{m/s} \cdot \text{s}$$

$$a = 10\ \text{m/s}^2$$

**FIGURA 3.11**
Análisis de movimiento.

## TIEMPO "DE VUELO"

Algunos deportistas y bailarines tienen una gran habilidad para saltar. Al alzarse de un salto, parecen "flotar en el aire" y desafiar la gravedad. Pide a tus amigos estimar el "tiempo de vuelo" de los grandes saltadores: el tiempo que un saltador está en el aire con los pies despegados del suelo. Pueden decir que 2 o 3 segundos. Pero, sorprendentemente, ¡el tiempo en el aire de los más grandes saltadores casi siempre es menor a 1 segundo! Un tiempo mayor es una de muchas ilusiones que se tienen acerca de la naturaleza.

Una ilusión relacionada es la altura vertical que puede saltar un ser humano. La mayoría de tus compañeros de clase probablemente no puedan saltar más de 0.5 metros. Pueden pasar por encima de una valla de 0.5 metros, pero, al hacerlo, su cuerpo sólo se eleva un poco. La altura de la barrera es diferente de la altura a la que se eleva el "centro de gravedad" del saltador. Muchas personas pueden saltar por encima de una valla de 1 metro, pero sólo rara vez alguien eleva el "centro de gravedad" de su cuerpo 1 metro. Ni siquiera las más grandes estrellas del baloncesto pueden elevar su cuerpo 1.25 metros de altura, aunque con facilidad *pueden* llegar bastante más arriba de la canasta, que está a más de 3 metros de altura.

La habilidad para saltar se mide mejor con un salto vertical estacionario. Párate frente a una pared con los pies bien asentados en el suelo y los brazos extendidos hacia arriba. Haz una marca sobre la pared en la parte superior de tu extensión. Luego realiza tu salto y, en el pico, haz otra marca. La distancia entre estas dos marcas mide tu salto vertical. Si es de más de 0.6 metros (2 pies), ¡eres excepcional!

He aquí la física. Cuando saltas hacia arriba, la fuerza del salto se aplica solamente mientras tus pies tienen contacto con el suelo. Cuanto mayor sea la fuerza, mayor será tu rapidez de lanzamiento y más alto será el salto. En cuanto tus pies abandonan el suelo, tu rapidez ascendente disminuye de inmediato a la tasa estable de $g$, 10 m/s$^2$. En la parte más alta de tu salto, tu rapidez ascendente disminuye a cero. Entonces comienzas a caer y ganas rapidez exactamente a la misma tasa, $g$. Si aterrizas como despegaste, recto con las piernas extendidas, entonces el tiempo de ascenso es igual al tiempo de caída. El tiempo en el aire es la suma de los tiempos de ascenso y de caída. Mientras estás en el aire, ningún tipo de bombeo de piernas o brazos u otros movimientos corporales pueden cambiar tu tiempo en el aire.

La relación entre el tiempo de subida o de bajada y la altura vertical está dada por:

$$d = \frac{1}{2} g t^2$$

Si conoces la altura vertical $d$, puedes reordenar esta expresión para obtener:

$$t = \sqrt{\frac{2d}{g}}$$

No se tienen noticias de algún jugador de baloncesto que haya logrado un salto vertical estacionario de 1.25 metros.[6] Si se establece que $d$ es igual a 1.25 metros y se usa el valor más preciso de 9.8 m/s$^2$ para $g$, se resuelve $t$, la mitad del tiempo "de vuelo", y se obtiene:

$$t = \sqrt{\frac{2d}{g}} = \sqrt{\frac{2(1.25\,\text{m})}{9.8\,\text{m/s}^2}} = 0.50\,\text{s}$$

Duplica este valor (porque éste es el tiempo para un sentido de un viaje redondo arriba y abajo) y obtendrás el tiempo en el aire para romper el récord de 1 segundo.

Aquí se estudia el movimiento vertical. ¿Y qué hay de los saltos al correr? En el Capítulo 10 aprenderás que el tiempo en el aire sólo depende de la rapidez vertical de lanzamiento del saltador. Mientras está en el aire, la rapidez horizontal del saltador permanece constante y sólo la rapidez vertical experimenta aceleración. ¡Física interesante!

[6]Para un salto al correr, la rapidez de despegue puede aumentar y el tiempo en el aire se extiende conforme los pies saltan del suelo. Esto se estudiará en el Capítulo 10.

## Qué tan rápido cambia el "qué tan rápido"

Gran parte de la confusión que surge cuando se analiza el movimiento de los objetos que caen se debe a que es fácil mezclar el "qué tan rápido" con el "cuánto recorre". Cuando se quiere especificar qué tan rápido cae algo, se habla de la *rapidez* o la *velocidad,* que se expresa como $v = gt$. Cuando se quiere especificar cuánto recorre algo que cae, se habla de la *distancia,* que se expresa como $d = \frac{1}{2} gt^2$. Es importante entender que la rapidez o la velocidad (qué tan rápido) y la distancia (cuánto recorre) son completamente diferentes entre sí.

Un concepto más confuso, y probablemente el más difícil que se encuentra en este libro, es el "qué tan rápido cambia el qué tan rápido" —aceleración—. Lo que hace que la aceleración sea tan compleja es que se trata de una *tasa de cambio.* Con frecuencia se confunde con la velocidad, que en sí misma es una tasa (la tasa de cambio de posición). La aceleración no es velocidad, ni siquiera es un cambio de velocidad. Es importante entender que la aceleración es la tasa a la que cambia la velocidad misma.

## 3.6 Vectores de velocidad

Mientras que la rapidez es una medida de "qué tan rápido", la velocidad es una medida de "qué tan rápido" y "en cuál dirección". Si la lectura en el velocímetro de un automóvil es de 100 kilómetros por hora (km/h), tú conoces la rapidez. Si también hay una brújula en el tablero e indica que el automóvil se mueve hacia el norte, por ejemplo, conoces su velocidad: 100 km/h hacia el norte. Conocer tu velocidad es conocer tu rapidez y tu dirección. La rapidez es una cantidad escalar y la velocidad es una cantidad vectorial.

**SCREENCAST: Vectores de velocidad**

Piensa en un avión que vuela hacia el norte a 80 km/h en relación con el aire circundante. Supón que el avión queda atrapado en un viento cruzado de 60 km/h (viento que sopla en ángulo recto con la dirección del avión) que lo desvía de su curso original. Este ejemplo se representa con vectores en la Figura 3.12, donde los vectores de velocidad se señalan en una escala tal que 1 centímetro (cm) representa 20 km/h. Por tanto, la velocidad de 80 km/h del avión se muestra con el vector de 4 cm, y el viento cruzado de 60 km/h se muestra con el vector de 3 cm. La diagonal del paralelogramo construido (en este caso, un rectángulo) mide 5 cm, que representa 100 km/h. De modo que el avión se mueve a 100 km/h en relación con el suelo en una dirección inclinada 37° hacia el este del norte.

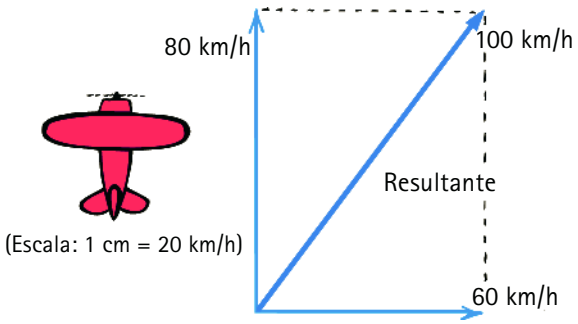



**FIGURA 3.12**
El viento cruzado de 60 km/h desvía de curso, a 100 km/h, al avión que viaja a 80 km/h.

El par de vectores de 6 y 8 unidades en ángulo recto dice: "podemos ser un seis y un ocho, pero juntos somos un 10 perfecto".

**PUNTO DE CONTROL**

**Piensa en un bote de motor que normalmente viaja a 10 km/h en aguas tranquilas. Si el bote se dirige directamente a través del río, que fluye a una tasa de 10 km/h, ¿cuál será su velocidad en relación con la orilla?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Cuando el bote se dirige a través de la corriente (en ángulo recto respecto del flujo del río), su velocidad es de 14.1 km/h, 45° corriente abajo. Recuerda del Capítulo 2 que el paralelogramo formado por un par de vectores con igual longitud en ángulo recto mutuo es un cuadrado que tiene una diagonal $\sqrt{2}$ veces la longitud de cada lado (Figura 2.9).

Por favor, recuerda que a las personas les tomó casi 2,000 años, desde la época de Aristóteles, para llegar a una clara comprensión del movimiento, ¡así que sé paciente contigo mismo si descubres que necesitas algunas horas para lograr esto!

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Rapidez.** Qué tan rápido se mueve un objeto; la distancia recorrida por unidad de tiempo.

**Rapidez instantánea.** La rapidez en algún instante.

**Rapidez promedio.** Distancia total recorrida dividida entre el tiempo de viaje.

**Velocidad.** Rapidez y dirección de movimiento de un objeto.

**Cantidad vectorial.** Cantidad que tiene tanto magnitud como dirección.

**Cantidad escalar.** Cantidad que sólo tiene una magnitud, no una dirección.

**Aceleración.** Tasa a la que cambia la velocidad con el tiempo; el cambio de velocidad puede ser en magnitud, dirección o ambos.

**Caída libre.** Movimiento sólo bajo la influencia de la gravedad.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 3.1 El movimiento es relativo

1. Mientras lees esto en tu silla, ¿qué tan rápido te mueves en relación con la silla? ¿En relación con el Sol?

### 3.2 Rapidez

2. ¿Cuáles son las dos unidades de medición necesarias para describir la rapidez?
3. ¿Qué tipo de rapidez registra el velocímetro de un automóvil: rapidez promedio o rapidez instantánea?
4. ¿Cuál es la rapidez promedio, en kilómetros por hora, de un caballo que galopa una distancia de 15 km en un tiempo de 30 min?
5. ¿Cuánto recorre un caballo que galopa a una rapidez promedio de 25 km/h durante 30 min?

### 3.3 Velocidad

6. ¿Cuál es la principal diferencia entre rapidez y velocidad?
7. Si un automóvil se mueve con una velocidad constante, ¿también se mueve con una rapidez constante?
8. Si un automóvil se mueve a 90 km/h y da vuelta a una esquina, también a 90 km/h, ¿mantiene una rapidez constante? ¿Una velocidad constante? Defiende tus respuestas.

### 3.4 Aceleración

9. ¿Cuál es la aceleración de un automóvil que se mueve en un camino recto y aumenta su rapidez de 0 a 100 km/h en 10 s?
10. ¿Cuál es la aceleración de un automóvil que mantiene una velocidad constante de 100 km/h durante 10 s? (¿Por qué algunos de tus compañeros de clase que respondieron correctamente la pregunta anterior responden mal esta pregunta?)
11. ¿Cuándo estás más consciente de tu movimiento en un vehículo en movimiento: cuando se mueve de manera estable en una línea recta o cuando acelera? Si estuvieras en un automóvil que se mueve con velocidad absolutamente constante (sin tumbos en absoluto), ¿estarías al tanto del movimiento?
12. Por lo general, la aceleración se define como la tasa de cambio en el tiempo de la velocidad. ¿Cuándo se puede definir como la tasa de cambio en el tiempo de la rapidez?
13. ¿Qué descubrió Galileo sobre la rapidez que gana una bola cada segundo cuando rueda hacia abajo por un plano inclinado? ¿Qué dice esto acerca de la aceleración de la bola?
14. ¿Qué relación descubrió Galileo entre la aceleración de una bola y la inclinación de un plano? ¿Qué aceleración ocurre cuando el plano es vertical?

### 3.5 Caída libre

15. ¿Qué se entiende exactamente por objeto en "caída libre"?
16. ¿Cuál es la ganancia en rapidez por segundo para un objeto en caída libre?
17. ¿Cuál es la velocidad adquirida por un objeto en caída libre 5 s después de soltarse desde una posición de reposo? ¿Cuál es la velocidad 6 s después?
18. La aceleración de caída libre es aproximadamente 10 $m/s^2$. ¿Por qué la unidad de segundos aparece dos veces?
19. Cuando un objeto se lanza hacia arriba, ¿cuánta rapidez pierde cada segundo (si ignoras la resistencia del aire)?
20. ¿Qué relación entre distancia recorrida y tiempo descubrió Galileo para los objetos en caída libre que se sueltan desde el reposo?
21. ¿Cuál es la distancia que recorre un objeto en caída libre 1 s después de soltarse desde una posición de reposo? ¿Cuál es la distancia para una caída de 4 s?
22. ¿Cuál es el efecto de la resistencia del aire sobre la aceleración de los objetos que caen?
23. Considera estas mediciones: 10 m, 10 m/s y 10 $m/s^2$. ¿Cuál es una medida de rapidez, cuál de distancia y cuál de aceleración?

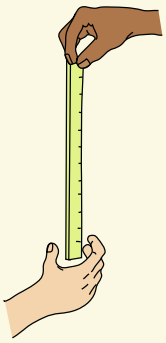
### 3.6 Vectores de velocidad

24. ¿Cuál es la rapidez en tierra de un avión que vuela a 100 km/h en relación con el aire, al que pescó un viento cruzado en ángulo recto de 100 km/h?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

25. La abuela está interesada en tu avance educativo. Envía a tu abuela un mensaje de texto y, sin usar ecuaciones, explícale la diferencia entre velocidad y aceleración.
26. Intenta esto con tus amigos. Sostén un billete de modo que su punto medio cuelgue entre los dedos de tu amigo y rétalo a atrapar el billete juntando sus dedos cuando sueltes el billete. ¡No podrá atraparlo! Explicación: de acuerdo con $d = \frac{1}{2} gt^2$, el billete caerá una distancia de 8 centímetros (la mitad de la longitud del billete) en un tiempo de 1/8 de segundo, pero el tiempo requerido para que los impulsos necesarios viajen de su ojo a su cerebro y de ahí a los dedos es de al menos 1/7 de segundo.

27. Puedes comparar tu tiempo de reacción con el de un amigo al atrapar una regla que se suelta entre tus dedos. Haz que tu amigo sostenga la regla como se muestra y tú cierra los dedos en cuanto veas la regla caer. El número de centímetros que pasan por tus dedos depende de tu tiempo de reacción. Puedes expresar el resultado en fracciones de segundo si reordenas $d = \frac{1}{2} gt^2$. Al expresarla para tiempo se obtiene $t = \sqrt{2}\, d/g = 0.045\sqrt{d}$, donde $d$ está en centímetros.



28. Párate con los pies bien asentados en el piso frente a una pared. Traza una marca en el punto más alto que puedas alcanzar. Luego salta verticalmente y marca este punto más alto. La distancia entre las dos marcas es tu distancia de salto vertical. Usa estos datos para calcular tu tiempo "de vuelo" (en el aire) personal.

## SUSTITUYE Y LISTO (FAMILIARIZACIÓN CON ECUACIONES)

*Estas son actividades del tipo "sustituye los números" para familiarizarte con las ecuaciones del capítulo. Principalmente son sustituciones de un paso y son menos difíciles que los Piensa y resuelve.*

$$\text{Rapidez} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$$

29. Demuestra que la rapidez promedio de un conejo que corre una distancia de 30 m en un tiempo de 2 s es 15 m/s.
30. Calcula tu rapidez promedio al caminar cuando das un paso de 1 m en 0.5 s.

$$\text{Rapidez promedio} = \frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

31. Demuestra que la aceleración de un automóvil que puede ir desde el reposo hasta 100 km/h en 10 s es 10 km/h·s.
32. Demuestra que la aceleración de un hámster es 5 m/s$^2$ cuando aumenta su velocidad desde el reposo a 10 m/s en 2 s.

$$\text{Distancia} = \text{rapidez promedio} \times \text{tiempo}$$

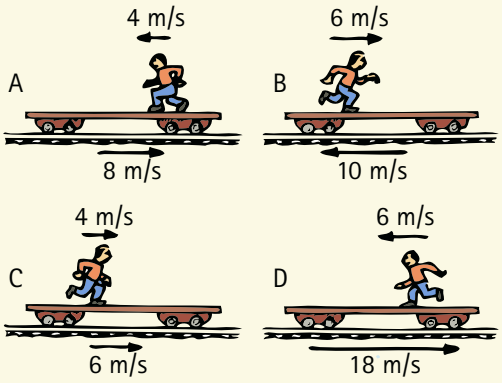
33. Demuestra que el hámster del problema anterior recorre una distancia de 22.5 m en 3 s.
34. Demuestra que una roca en caída libre cae una distancia de 45 m cuando se suelta desde el reposo durante 3 s.

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

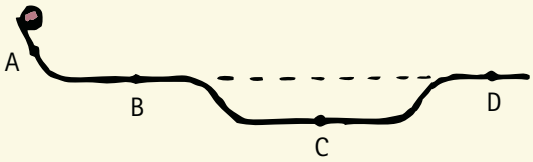
35. Tú lanzas una bola recto hacia arriba con una rapidez inicial de 30 m/s. ¿Qué tan alto sube y cuánto tiempo permanece en el aire (ignora la resistencia del aire)?
36. Una bola se lanza con suficiente rapidez, recto hacia arriba, de modo que está en el aire durante varios segundos. (a) ¿Cuál es la velocidad de la bola cuando alcanza su punto más alto? (b) ¿Cuál es su velocidad 1 s antes de alcanzar su punto más alto? (c) ¿Cuál es el cambio de velocidad durante este intervalo de 1 s? (d) ¿Cuál es su velocidad 1 s después de alcanzar su punto más alto? (e) ¿Cuál es el cambio de velocidad durante este intervalo de 1 s? (f) ¿Cuál es el cambio de velocidad durante el intervalo de 2 s? (¡Cuidado!) (g) ¿Cuál es la aceleración de la bola durante cualquiera de estos intervalos de tiempo y en el momento cuando la bola tiene velocidad cero?
37. ¿Cuál es la velocidad instantánea de un objeto en caída libre 10 s después de que se suelta desde una posición de reposo? ¿Cuál es su velocidad promedio durante este intervalo de 10 s? ¿Qué distancia caerá durante este tiempo?
38. Un automóvil tarda 10 s en ir desde $v = 0$ m/s hasta $v = 25$ m/s a aceleración constante. Si quieres encontrar la distancia recorrida con la ecuación $d = 1/2\ at^2$, ¿qué valor debes usar para $a$?
39. Sorprendentemente, muy pocos deportistas pueden saltar más de 2 pies (0.6 m) recto hacia arriba. Usa $d = 1/2\ gt^2$ para conocer el tiempo que uno destina a moverse hacia arriba en un salto vertical de 0.6 m. Luego duplícalo para conocer el "tiempo de vuelo", el tiempo que los pies están despegados del suelo.
40. Un dardo sale del cañón de una pistola de aire con una rapidez $v$. La longitud del cañón de la pistola de aire es $L$. Supón que la aceleración del dardo en el cañón es uniforme.
    a. Demuestra que el dardo se mueve dentro del cañón durante un tiempo de $2\ L/v$.
    b. Si la rapidez de salida del dardo es 15 m/s y la longitud del cañón de la pistola de aire es 1.4 m, demuestra que el tiempo que el dardo está en el cañón es de 0.19 s.

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

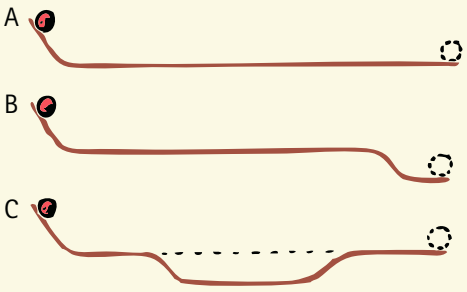
41. El trotador Jake corre por una plataforma de ferrocarril que se mueve con las velocidades que se muestran en las posiciones A-D. De mayor a menor, clasifica las velocidades de Jake en relación con un observador estacionario en el suelo. (Llama positiva la dirección hacia la derecha.)




42. Se hace una pista con una pieza de hierro acanalado, como se muestra. Una bola que se suelta en el extremo izquierdo de la pista pasa por los distintos puntos. Clasifica las rapideces de la bola en los puntos A, B, C y D, del más rápido al más lento. (Ten cuidado con las clasificaciones que empaten.)

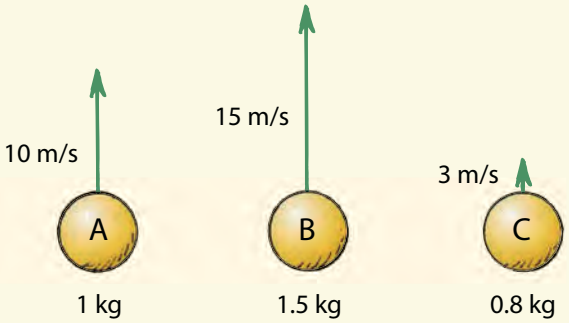



43. Una bola se suelta en el extremo izquierdo de estas tres pistas diferentes. Las pistas se doblan a partir de trozos de igual longitud de hierro acanalado.



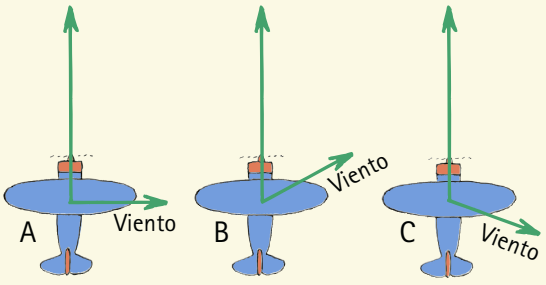

a. De la más rápida a la más lenta, clasifica las rapideces de las bolas en los extremos derechos de las pistas.
b. De la más larga a la más corta, clasifica las pistas en términos de los *tiempos* que transcurren para que las bolas lleguen a los extremos.
c. De mayor a menor, clasifica las pistas en términos de las *rapideces promedio* de las bolas. ¿O todas las bolas tienen la misma rapidez promedio en las tres pistas?

44. Tres bolas de diferentes masas se lanzan recto hacia arriba con las rapideces iniciales indicadas.

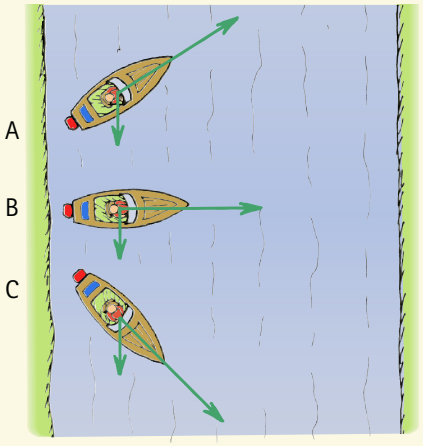



a. De la más rápida a la más lenta, clasifica las rapideces de las bolas 1 s después de lanzarlas.
b. De mayor a menor, clasifica las aceleraciones de las bolas 1 s después de lanzarlas. (¿O las aceleraciones son iguales?)

45. Aquí tienes una vista superior de un avión que se desvía de su curso por vientos que soplan en tres direcciones diferentes. Usa un lápiz y la regla del paralelogramo para dibujar los vectores que muestren las velocidades resultantes en cada caso. Clasifica las rapideces del avión en tierra, de más rápida a más lenta.




46. Aquí tienes una vista superior de tres botes de motor que cruzan un río. Todos tienen la misma rapidez en relación con el agua y todos experimentan la misma corriente del río. Construye vectores resultantes que muestren la rapidez y la dirección de cada bote. Clasifica los botes de más a menos para:
a. el tiempo para llegar a la orilla opuesta.
b. el viaje más rápido.

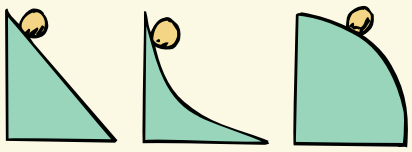


## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

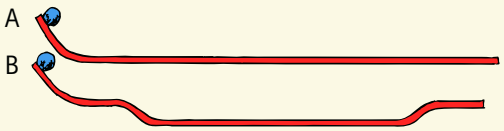
47. Mo mide su tiempo de reacción en 0.18 en el ejercicio 27 del Piensa y realiza. Jo mide su tiempo de reacción en 0.20 s. ¿Quién tiene el tiempo de reacción más favorable? Explica.
48. Jo, con un tiempo de reacción de 0.2 segundos, viaja en su bicicleta con una rapidez de 6.0 m/s. Ella encuentra una situación de emergencia e "inmediatamente" aplica sus frenos. ¿Cuánto recorre Jo antes de realmente aplicar los frenos?
49. ¿Cuál es la rapidez de impacto de un automóvil que se mueve a 100 km/h y choca con la parte trasera de otro automóvil que viaja en la misma dirección a 98 km/h?
50. Suzie Pieseguro puede remar una canoa en aguas tranquilas a 8 km/h. ¿Cuánto éxito tendrá si rema corriente arriba en un río que fluye a 8 km/h?
51. ¿Una multa por rebasar el límite de velocidad se basa en la rapidez promedio o en la rapidez instantánea? Explica.
52. Un avión viaja hacia el norte a 300 km/h mientras otro viaja hacia el sur a 300 km/h. ¿Sus rapideces son iguales? ¿Sus velocidades son iguales? Explica.
53. La luz viaja en línea recta con una rapidez constante de 300,000 km/s. ¿Cuál es la aceleración de la luz?
54. Tú viajas en un automóvil con un límite de rapidez específico. Ves que un automóvil se aproxima hacia ti con la misma rapidez. ¿Cuán rápido se aproxima el automóvil hacia ti, comparado con el límite de rapidez?
55. Tú conduces hacia el norte sobre una autopista. Luego, sin cambiar de rapidez, das vuelta en una curva y conduces hacia el este. (a) ¿Cambia tu velocidad? (b) ¿Aceleras? Explica.
56. Jacob dice que la aceleración es qué tan rápido vas. Emily dice que la aceleración es qué tan rápido te vuelves rápido. Ambos buscan tu confirmación. ¿Quién está en lo correcto?
57. A partir del reposo, un automóvil acelera hasta una rapidez de 50 km/h, y otro automóvil acelera hasta una rapidez de 60 km/h. ¿Puedes decir cuál automóvil experimenta mayor aceleración? ¿Por qué sí o por qué no?
58. ¿Cuál es la aceleración de un automóvil que se mueve con una velocidad constante de 100 km/h durante 100 s? Explica tu respuesta.
59. ¿Cuál es mayor: una aceleración desde 25 km/h hasta 30 km/h, o una desde 96 km/h hasta 100 km/h, si ambas ocurren durante el mismo tiempo?
60. Galileo experimentó con bolas que rodaban sobre planos inclinados a varios ángulos. ¿Cuál es el rango de aceleraciones para ángulos desde 0° hasta 90° (desde cuál aceleración hasta cuál otra)?
61. Supón que un objeto en caída libre de algún modo se equipa con un velocímetro. ¿En cuánto aumentaría su lectura de rapidez con cada segundo de caída?
62. Supón que el objeto en caída libre del ejercicio anterior también está equipado con un odómetro. ¿Las lecturas de la distancia que cae cada segundo indicarían iguales o diferentes distancias de caída por segundos sucesivos?
63. Para un objeto en caída libre soltado desde el reposo, ¿cuál es la *aceleración* al final del quinto segundo de caída? ¿Al final del décimo segundo de caída? Defiende tus respuestas.
64. Si la resistencia del aire se puede pasar por alto, ¿cuál es la diferencia entre la aceleración de una bola que se lanzó recta hacia arriba y su aceleración cuando simplemente se suelta?
65. Cuando un jugador de béisbol lanza una bola recto hacia arriba, ¿en cuánto se reduce la rapidez de la bola cada segundo mientras asciende? En ausencia de resistencia del aire, ¿en cuánto aumenta la rapidez cada segundo mientras desciende? ¿Cuál es el tiempo requerido para subir, comparado con el tiempo de caída?
66. Boy Bob está de pie en el borde de un risco (como en la Figura 3.8) y lanza una bola casi recta hacia arriba con cierta rapidez y otra bola casi recta hacia abajo con la misma rapidez inicial. Si la resistencia del aire es irrelevante, ¿cuál bola tendrá mayor rapidez cuando golpee el suelo abajo?
67. Responde la pregunta anterior para el caso donde la resistencia del aire *no* sea insignificante, es decir, donde el arrastre del aire afecte al movimiento.
68. Mientras hace rodar bolas hacia abajo por un plano inclinado, Galileo observa que la bola rueda 1 codo (la distancia del codo a la punta de los dedos) mientras cuenta hasta 10. ¿Cuánto habrá rodado la bola, desde su punto de partida, cuando cuente hasta 20?
69. Considera un proyectil lanzado verticalmente cuando el arrastre del aire es irrelevante. ¿Cuándo es mayor la aceleración debida a la gravedad: cuando asciende, en la parte superior o cuando desciende? Defiende tu respuesta.
70. Extiende las Tablas 3.2 y 3.3 para incluir tiempos de caída de 6 a 10 s, y asume que no hay resistencia del aire.
71. Si no hubiera la resistencia del aire, ¿por qué sería peligroso salir a la calle los días lluviosos?
72. A medida que aumenta la rapidez de un objeto en caída libre, ¿la aceleración también aumenta?
73. Una bola lanzada hacia arriba regresará al mismo punto con la misma rapidez inicial cuando la resistencia del aire sea despreciable. Cuando la resistencia del aire no es despreciable, ¿cómo se compara su rapidez de regreso con su rapidez inicial?
74. ¿Por qué el tiempo en el aire de una persona sería mucho mayor en la Luna que en la Tierra?
75. ¿Por qué un chorro de agua se estrecha a medida que cae del grifo?
76. La lluvia que cae verticalmente forma manchas inclinadas en las ventanas laterales de un automóvil en movimiento. Si las manchas forman un ángulo de 45°, ¿cuál es la diferencia entre la rapidez del automóvil y la de la lluvia que cae?
77. Plantea una pregunta de opción múltiple que compruebe que tus compañeros de clase entendieron la diferencia entre rapidez y velocidad.
78. Plantea una pregunta de opción múltiple que compruebe que tus compañeros de clase entendieron la diferencia entre velocidad y aceleración.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

79. ¿Un automóvil con una velocidad hacia el norte puede tener simultáneamente una aceleración hacia el sur? Convence a tus compañeros de clase de tu respuesta.
80. ¿Un objeto puede invertir su dirección de viaje mientras mantiene una aceleración constante? Si es así, proporciona un ejemplo a tus compañeros de clase. Si no, ofrece una explicación.
81. Para el movimiento en línea recta, explica a tus compañeros de clase cómo un velocímetro indica si ocurre o no aceleración.
82. Corrige a tu amigo que dice: "el dragster dio vuelta a la esquina con una velocidad constante de 100 km/h".
83. Cita un ejemplo de algo que tenga una rapidez constante que también tenga una velocidad variable. ¿Puedes citar un ejemplo de algo con una velocidad constante y una rapidez variable? Defiende tus respuestas.
84. Cita un ejemplo en el que tu rapidez pueda ser cero mientras que tu aceleración sea distinta de cero.
85. Cita un ejemplo de algo que experimente aceleración mientras se mueve con rapidez constante. ¿También puedes proporcionar un ejemplo de algo que acelere mientras viaja con velocidad constante? Explica a tus compañeros de clase.
86. (a) ¿Un objeto puede moverse cuando su aceleración es cero? Si es así, proporciona un ejemplo. (b) ¿Un objeto puede acelerar cuando su rapidez es cero? Si es así, da un ejemplo.
87. ¿Puedes citar un ejemplo en el que la aceleración de un cuerpo tenga una dirección opuesta a su velocidad? Si es así, ¿qué ejemplo puedes citar a tus compañeros de clase?
88. ¿En cuál de estas colinas la bola rueda hacia abajo con rapidez creciente y aceleración decreciente a lo largo de la trayectoria? (Usa este ejemplo si quieres explicar a alguien la diferencia entre rapidez y aceleración.)



89. Supón que las tres bolas que se muestran en el ejercicio 88 parten simultáneamente desde lo alto de las colinas. ¿Cuál llega primero al fondo? Explica.
90. Sé quisquilloso y corrige a tu amigo que dice: "en caída libre, la resistencia del aire es más efectiva para frenar una pluma que una moneda".
91. Si sueltas un objeto, su aceleración hacia el suelo es de 10 m/s$^2$. Si lo lanzas hacia abajo, ¿su aceleración después de lanzarlo será mayor que 10 m/s$^2$? ¿Por qué sí o por qué no?
92. En el ejercicio anterior, ¿puedes pensar en una razón por la que la aceleración del objeto lanzado hacia abajo a través del aire pueda ser notablemente menor que 10 m/s$^2$? Discute tu razonamiento con tus compañeros de clase.
93. Uno de tus amigos dice que si un automóvil viaja hacia el este, no puede al mismo tiempo acelerar hacia el oeste. ¿Cuál es tu respuesta?
94. Madison lanza una bola recto hacia arriba. Anthony suelta una bola. Tu compañero de discusión dice que ambas bolas experimentan la misma aceleración. ¿Cuál es tu respuesta?
95. Dos bolas se sueltan en forma simultánea desde el reposo en el extremo izquierdo de las pistas de igual longitud A y B, como se muestra. ¿Cuál bola llega primero al final de su pista?




96. Consulta el par de pistas del ejercicio anterior. (a) ¿En cuál pista la rapidez promedio es mayor? (b) ¿Por qué la rapidez de la bola al final de las pistas es la misma?
97. Un bote cruza un río con una rapidez de 3 m/s. Convence a tus compañeros de clase de que, si el río fluye a 4 m/s, la rapidez del bote en relación con la ribera es de 5 m/s.
98. Si gotas de lluvia caen verticalmente con una rapidez de 3 m/s y tú corres horizontalmente a 4 m/s, convence a tus compañeros de clase de que las gotas golpearán tu rostro con una rapidez de 5 m/s.
99. Un avión con una rapidez en el aire de 120 km/h encuentra un viento cruzado de 90 km/h. Convence a tus compañeros de clase de que la rapidez en tierra del avión es de 150 km/h.
100. En este capítulo estudiaste casos idealizados de bolas que ruedan sobre planos lisos y objetos que caen sin resistencia del aire. Supón que un compañero de clase se queja de que toda esta atención centrada en casos idealizados no vale la pena porque los casos idealizados simplemente no ocurren en el mundo cotidiano. ¿Cómo responderías a esta queja? ¿Cómo supones respondería el autor de este libro?

Recuerda: las *Preguntas conceptuales* te permiten comprobar si comprendiste las ideas centrales del capítulo. Las de *Sustituye y listo* y las de *Piensa y resuelve* se centran en la naturaleza matemática del material del capítulo. Puedes emplear tu pensamiento crítico con las de *Piensa y clasifica*. Los ejercicios *Piensa y explica* y *Piensa y discute* son "el remate" para redondear la cobertura del material del capítulo.

# 4

CAPÍTULO 4

# Segunda ley de Newton de movimiento


4.1 La fuerza causa aceleración

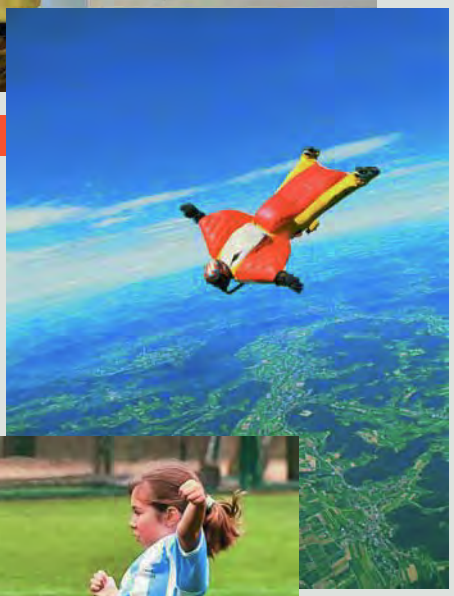
4.2 Fricción

4.3 Masa y peso

4.4 Segunda ley de Newton de movimiento

4.5 Cuando la aceleración es *g*: caída libre

4.6 Cuando la aceleración es menor que *g*: caída no libre



**1** Jill Johnsen pregunta a sus alumnos por qué la bola más pesada, cuando se suelta, no cae más rápido que la bola más ligera. **2** Efraín López muestra que, cuando las fuerzas sobre el bloque azul se equilibran en cero, no ocurre aceleración. **3** Los paracaidistas con trajes aéreos (*wingsuits*) hacen lo que las ardillas voladoras siempre han hecho, pero más rápido. **4** Cuando Emily Abrams patea el balón, éste experimenta una aceleración.

Galileo introdujo el concepto de *aceleración*, es decir, la tasa a la que cambia la velocidad con el tiempo: $a = \Delta v/\Delta t$. Pero, ¿qué produce la aceleración? Esa pregunta la responde la segunda ley de Newton. Es la *fuerza*. La segunda ley de Newton vincula los conceptos fundamentales de aceleración y fuerza con el concepto de *masa* de Galileo, dado por la famosa ecuación $a = F/m$. Es interesante que Isaac Newton se haya vuelto famoso no por sus leyes de movimiento y ni siquiera por su ley de la gravitación universal. Su fama comenzó con su estudio de la luz, pues observó que la luz blanca estaba compuesta de los colores del arcoíris.

Isaac Newton nació prematuramente el día de Navidad de 1642 y apenas sobrevivió en la hacienda de su madre en Inglaterra. Su padre murió varios meses antes de su nacimiento y él creció bajo el cuidado de su madre y su abuela. En su niñez no mostró signos particulares de brillantez; cuando era adolescente, lo sacaron de la escuela para que ayudara a su madre a administrar su hacienda. Tenía poco interés en las labores de cultivo y prefería leer los libros que pedía prestados a un vecino. Un tío suyo, quien percibió el potencial académico del joven Isaac, hizo arreglos para que regresara a la escuela durante un año y luego se graduara de la Universidad de Cambridge, sin distinción particular.

Cuando una plaga azotó Inglaterra, Newton se retiró a la hacienda de su madre, esta vez para continuar sus estudios. Ahí, a la edad de 22 y 23 años, sentó los cimientos de la obra que habría de inmortalizarlo. La leyenda dice que ver caer una manzana al suelo lo condujo a pensar en la fuerza de la gravedad que se extiende hasta la Luna y más allá. Formuló y aplicó la ley de la gravitación universal para resolver los misterios centenarios del movimiento planetario y las mareas oceánicas, que estudiarás en el Capítulo 9.

A los 26 años de edad, Newton fue nombrado profesor lucasiano de matemáticas en el Trinity College en Cambridge. Tuvo conflictos personales con las posturas religiosas del instituto, a saber, cuestionar la idea de la trinidad como un dogma fundamental del cristianismo en aquella época. No fue sino hasta que Newton tuvo 42 años de edad cuando incluyó sus tres leyes de movimiento en lo que generalmente se reconoce como el libro científico más importante jamás escrito, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.

**Isaac Newton (1642-1727)**

Cuando Newton cumplió 46 años, sus energías se alejaron un poco de la ciencia y fue elegido como miembro del Parlamento por un periodo de un año. A los 57 fue elegido para un segundo periodo. En los dos años que estuvo en el Parlamento nunca pronunció discurso alguno. Un día se puso de pie y la Cámara guardó silencio para escuchar al gran hombre. El "discurso" de Newton fue muy breve: simplemente pidió que cerraran una ventana porque había una corriente de aire. También fue miembro de la Royal Society, donde, a los 60 años de edad, fue elegido presidente y después fue reelecto año tras año durante el resto de su vida.

Aunque a los 30 años de edad Newton ya tenía el cabello gris, permaneció abundante, largo y ondulado toda su vida y, a diferencia de otros en su época, no usó peluca. Era un hombre modesto, enormemente sensible a las críticas y nunca se casó. Continuó sano en cuerpo y mente hasta edad longeva. A los 80 años de edad todavía tenía todos sus dientes, su vista y audición eran agudas y su mente era lúcida. En su vida fue considerado por sus compatriotas como el científico más grandioso que hubiera vivido jamás. Fue nombrado caballero por la reina Anna en 1705.

Newton murió a los 84 años de edad y fue enterrado en la Abadía de Westminster junto con los monarcas y héroes de Inglaterra. Sus leyes del movimiento proporcionaron los cimientos para el Programa Apollo, que 282 años después colocó a los seres humanos en la Luna. Su primera ley fue la ley de la inercia, que estudiaste en el Capítulo 2. En este capítulo estudiarás su segunda ley de movimiento.

## 4.1 La fuerza causa aceleración

**FIGURA 4.1**
Patea la bola y ella acelera.

Piensa en un disco de hockey en reposo sobre el hielo. Golpea el disco (aplica una **fuerza**), y éste acelera. Cuando el bastón de hockey ya no lo empuja (esto es, cuando sobre el disco ya no actúan fuerzas desequilibradas) el disco se mueve con velocidad constante. Si aplicas otra fuerza al golpear nuevamente el disco, de nuevo cambia el movimiento. Las fuerzas desequilibradas que actúan sobre un objeto hacen que el objeto acelere.

Con mucha frecuencia, la fuerza aplicada no es la única fuerza que actúa sobre un objeto. También pueden actuar otras fuerzas. Recuerda del Capítulo 2 que la combinación de las fuerzas que actúan sobre un objeto es la *fuerza neta*. La aceleración depende de la *fuerza neta*. Para aumentar la aceleración de un objeto debes aumentar la fuerza

neta que actúa sobre él. Si duplicas la fuerza neta sobre un objeto, su aceleración se duplica; si triplicas la fuerza neta, su aceleración se triplica; y así sucesivamente. Esto tiene sentido. Se dice que la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él y se escribe:

$$\text{Aceleración} \sim \text{fuerza neta}$$

El símbolo ~ significa "es directamente proporcional a". Ello significa, por ejemplo, que si uno se duplica, el otro también se duplica.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Empuja una caja que esté sobre un piso liso y acelera. Si aplicas cuatro veces la fuerza neta, ¿cuánto mayor será la aceleración?**
2. **Si empujas con la misma fuerza aumentada sobre la misma caja encima de un piso muy rugoso, ¿la aceleración será mayor o menor que si la empujaras sobre un piso liso? *(¡Piensa antes de leer la respuesta abajo!)***

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La caja tendrá cuatro veces más aceleración.
2. La caja tendrá menos aceleración porque la fricción reducirá la fuerza neta.

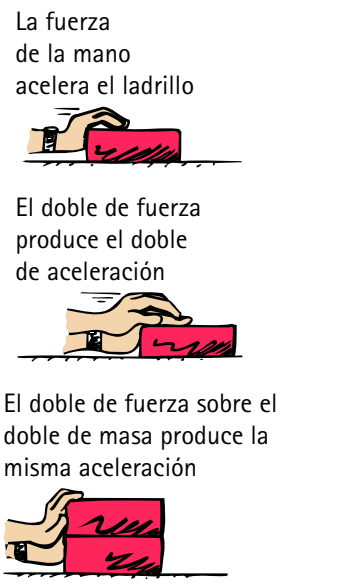



**FIGURA 4.2**
La aceleración es directamente proporcional a la fuerza.

**VIDEO: La fuerza causa una aceleración**

## 4.2 Fricción

Cuando las superficies se deslizan o tienden a deslizarse una sobre otra, actúa una fuerza de **fricción**. Cuando aplicas una fuerza a un objeto, la fricción por lo general reduce la fuerza neta y la aceleración resultante. La fricción es causada por las irregularidades de las superficies que están en contacto mutuo y depende de los tipos de material y de cuánto se presionan entre sí. Incluso las superficies que parecen ser muy lisas tienen irregularidades microscópicas que obstruyen el movimiento. Los átomos se adhieren en muchos puntos de contacto. Cuando un objeto se desliza contra otro, el primero debe elevarse sobre las salientes irregulares o de otro modo desprender átomos. De cualquier forma se necesita una fuerza.

La dirección de la fuerza de fricción siempre es en la dirección contraria al movimiento. Un objeto que se desliza *hacia abajo* por un plano inclinado experimenta una fricción dirigida *hacia arriba* del plano; un objeto que se desliza hacia la *derecha* experimenta fricción hacia la *izquierda*. Por ende, si un objeto debe moverse con velocidad constante, debe aplicarse una fuerza igual a la fuerza de fricción opuesta para que las dos fuerzas se cancelen exactamente una a la otra. La fuerza neta igual a cero entonces resulta en una aceleración igual a cero y una velocidad constante.

Sobre una caja que se asienta en reposo encima de un piso a nivel no existe fricción. Pero si empujas la caja en sentido horizontal perturbarás las superficies de contacto y se producirá fricción. ¿Cuánta? Si la caja todavía está en reposo, entonces la fricción que se opone al movimiento es suficiente para cancelar tu empuje. Si empujas horizontalmente con, por decir, 70 newtons, la fricción se acumula para volverse 70 newtons. Si empujas más duro (por decir, 100 newtons) y la caja está a punto de deslizarse, la fricción entre la caja y el suelo se opone a tu empuje con 100 newtons. Si 100 newtons es lo más que puede reunir la superficie, entonces, cuando empujas un poco más duro, la adherencia cede y la caja se desliza.[1]

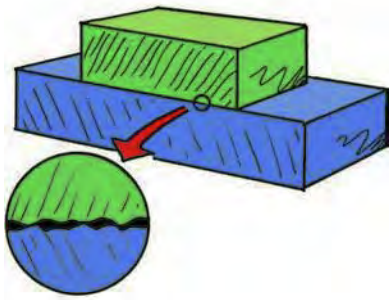


**FIGURA 4.3**
La fricción es consecuencia de las irregularidades en las superficies y de atracciones mutuas (pegajosidad) entre los átomos de las superficies de los objetos que se deslizan. Incluso las superficies que parecen ser lisas tienen superficies irregulares cuando se ven a nivel microscópico.

[1]Aun cuando pueda no parecerlo todavía, la mayor parte de los conceptos en física realmente no son complicados. Pero la fricción es diferente: es un fenómeno muy complicado. Los hallazgos son empíricos (obtenidos a partir de una amplia serie de experimentos) y las predicciones son aproximadas (también con base en la experimentación).

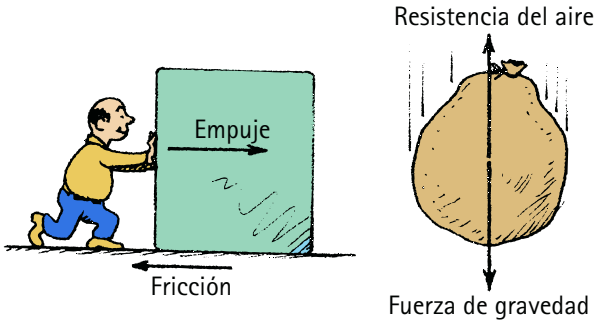



**FIGURA 4.4**
La dirección de la fuerza de fricción siempre se opone a la dirección del movimiento. (Izquierda) Empuja la caja hacia la derecha y la fricción actúa hacia la izquierda. (Derecha) La fuerza de gravedad sobre el costal actúa hacia abajo y la fricción del aire (resistencia del aire) actúa hacia arriba. (¿Cuál es la aceleración del costal cuando la resistencia del aire se incrementa hasta coincidir con la fuerza de la gravedad?)

Las llantas tienen canales, no para aumentar la fricción, sino para desplazar y redirigir el agua de entre la superficie del camino y el lado de abajo de la llanta. Muchos automóviles de carreras usan llantas sin estrías porque corren en días secos.

Es interesante saber que la fricción de deslizamiento es un poco menor que la fricción que se acumula antes de que el deslizamiento tenga lugar. Los físicos e ingenieros distinguen entre *fricción estática* y *resistencia al deslizamiento* (conocida, también, como fricción cinética). Para superficies dadas, la fricción estática es un poco mayor que la resistencia al deslizamiento. Si empujas una caja, necesitas más fuerza para ponerla en marcha que para mantenerla en deslizamiento. Antes de la época de los sistemas de frenos antibloqueo, las frenadas en seco de un automóvil eran bastante problemáticas. Cuando las llantas se bloquean, éstas se deslizan, lo que proporciona menos fricción que si rodaran hasta detenerse. Una llanta que rueda no se desliza a lo largo de la superficie del camino, y la fricción es fricción estática, con más agarre que la fricción cinética. Pero una vez que las llantas comienzan a deslizarse, la fuerza de fricción se reduce, lo que no es algo bueno. Un sistema de frenado antibloqueo mantiene las llantas por debajo del umbral de pérdida de frenado para comenzar a deslizarse.

También es interesante que la fuerza de fricción no dependa de la rapidez. Un automóvil que patina a baja rapidez tiene aproximadamente la misma fricción que el mismo automóvil que derrapa con una gran rapidez. Si la fuerza de fricción sobre una llanta es de 100 newtons a baja rapidez, con una buena aproximación es de 100 newtons a una rapidez mayor. La fuerza de fricción puede ser mayor cuando la llanta está en reposo y a punto de deslizarse, pero, una vez que se desliza, la fuerza de fricción permanece aproximadamente igual.

Más interesante aún: la fricción no depende del área de contacto. En una llanta más estrecha, el mismo peso se concentra en un área menor sin que cambie la cantidad de fricción. De modo que las llantas extra anchas que ves en algunos automóviles no proporcionan más fricción que las llantas más angostas. Las llantas más anchas tan sólo distribuyen el peso del automóvil sobre un área mayor para reducir el calentamiento y el desgaste. De igual forma, ¡la fricción entre un camión y el suelo es la misma ya sea que el camión tenga cuatro llantas o 18! Más llantas distribuyen la carga sobre más área de terreno y reducen la presión en cada llanta. La distancia de frenado cuando se aplican los frenos no cambia con el número de llantas. Pero el desgaste que experimentan las llantas depende mucho del número de éstas.

**FIGURA 4.5**
La fricción entre la llanta y el terreno es casi la misma ya sea que la llanta sea ancha o angosta. El propósito de la mayor área de contacto es reducir el calentamiento y el desgaste.

La fricción no se limita a sólidos que se deslizan o tienden a deslizarse uno sobre otro. Ésta también ocurre en líquidos y gases, los cuales se llaman *fluidos* (porque fluyen). La fricción de los fluidos ocurre cuando un objeto hace a un lado el fluido por el que se mueve. ¿Alguna vez has intentado correr 100 m con el agua a la altura de la cintura? La fricción de los fluidos es considerable, incluso a bajas rapideces. De modo que, a diferencia de la fricción entre superficies sólidas, la fricción de los fluidos depende de la rapidez. Una forma muy común de fricción de fluidos para algo que se mueve a través del aire es la *resistencia del aire,* también llamada *arrastre aerodinámico*. Por lo general, no percibes la resistencia del aire cuando caminas o trotas, pero sí la percibes a rapideces más grandes cuando viajas en bicicleta o te deslizas en esquíes colina abajo. La resistencia del aire aumenta con la rapidez. El costal en caída que se muestra en la Figura 4.4 alcanzará una velocidad constante cuando la resistencia del aire equilibre la fuerza debida a la gravedad sobre el costal.

**VIDEO: Fricción**

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Qué fuerza neta experimenta una caja en deslizamiento cuando ejerces una fuerza de 110 N y la fricción entre la caja y el suelo es de 100 N?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

10 N en la dirección de tu empuje (110 N – 100 N).

## 4.3 Masa y peso

**SCREENCAST: Masa/peso**

La aceleración que se imparte a un objeto depende no sólo de las fuerzas aplicadas y las fuerzas de fricción, sino de la inercia del objeto, su resistencia a los cambios de movimiento. La cantidad de inercia que posee un objeto depende de la cantidad de materia que contenga: mientras más materia, más inercia. Para hablar de la cantidad de materia que tiene algo, se utiliza el término *masa*. Mientras mayor sea la masa de un objeto, mayor es su inercia. La comprensión actual de la masa ahonda en su fuente, el recientemente descubierto bosón de Higgs. (Intrigante, sin duda, y se abordará en el Capítulo 32.) Por el momento, primero querrás comprender la masa en su sentido más simple: como una medida de la inercia de un objeto material. Cuanto mayor sea la masa de un objeto, mayor será su inercia.

La masa corresponde a la noción intuitiva de peso. Informalmente, se dice que algo tiene mucha materia si pesa mucho. Pero existe una diferencia entre masa y peso. Cada uno se puede definir del modo siguiente:

**Masa:** ***cantidad de materia en un objeto. También es la medida de la inercia o pereza que un objeto muestra en respuesta a cualquier esfuerzo hecho para ponerlo en movimiento, frenarlo o cambiar su estado de movimiento en cualquier forma.***

**Peso:** ***por lo general, la fuerza sobre un objeto debida a la gravedad.***

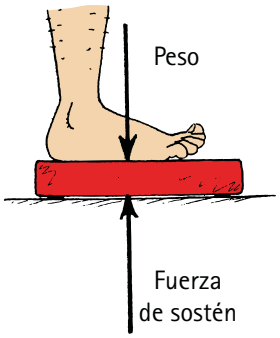



**FIGURA 4.6**
En equilibrio sobre una báscula, el peso (*mg*) es equilibrado por una fuerza de sostén ascendente.

En la definición de peso se dice *por lo general* porque un objeto puede tener peso cuando la gravedad no es un factor, como ocurre en una estación espacial en rotación. En cualquier caso, cerca de la superficie de la Tierra y en ausencia de aceleración, masa y peso son directamente proporcionales entre ellos.[2]

El peso de un objeto de masa $m$ debido a la gravedad es igual a $mg$, donde $g$ es la constante de proporcionalidad y tiene el valor 10 N/kg (más precisamente, 9.8 N/kg). De manera equivalente, $g$ es la aceleración debida a la gravedad, 10 m/s$^2$ (la unidad N/kg es equivalente a m/s$^2$).

La proporción directa entre la masa y el peso dice que si la masa de un objeto se duplica, su peso también se duplica; si la masa se reduce a la mitad, el peso se reduce a la mitad. Debido a esto, masa y peso con frecuencia se usan en forma indistinta. Además, en ocasiones se confunden masa y peso porque es habitual medir la cantidad de materia que tienen las cosas (masa) mediante su atracción gravitacional a la Tierra (peso). Pero la masa es más fundamental que el peso; es una cantidad fundamental que escapa por completo a la observación de la mayoría de las personas.

Hay momentos en los que el peso corresponde a la noción inconsciente de inercia. Por ejemplo, si intentas determinar cuál de dos objetos pequeños es el más pesado, puedes agitarlos atrás y adelante en tus manos o moverlos en alguna forma en lugar de levantarlos. Al hacerlo, juzgas cuál de los dos es más difícil de poner en movimiento y sientes cuál de los dos es más resistente a un cambio de movimiento. En realidad comparas las inercias de los objetos: sus masas.

En Estados Unidos, la cantidad de materia de un objeto suele describirse por el jalón gravitacional entre él y la Tierra, o su *peso,* que por lo general se expresa en *libras*. Sin

**pti**

- Cuando 1 N actúa sobre 1 kg, la aceleración = 1 m/s$^2$. Con unidades, $a = F/m$ se lee 1 m/s$^2$ = 1 N/1 kg. De modo que las unidades m/s$^2$ y N/kg son equivalentes.

[2]En el Capítulo 8 estudiarás cómo la fuerza de sostén que proporciona la rotación produce una *gravedad simulada*, en la que un astronauta en un hábitat espacial rotatorio experimenta peso.

**FIGURA 4.7**
El astronauta en el espacio descubre que es tan difícil agitar el yunque "que no pesa nada" como lo sería en la Tierra. Si el yunque tuviera más masa que el astronauta, ¿cuál se agitaría más: el yunque o el astronauta?

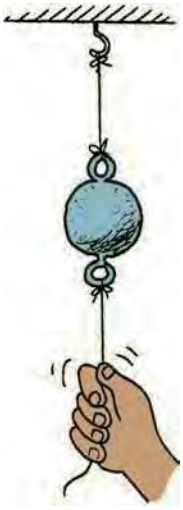


**FIGURA 4.8**
¿Por qué un aumento lento y continuo de la fuerza descendente romperá la cuerda arriba de la bola masiva, mientras que un aumento súbito romperá la cuerda inferior?

embargo, en la mayor parte del mundo, la medida de la materia usualmente se expresa en una unidad de masa, el **kilogramo**. En la superficie de la Tierra, un ladrillo con una masa de 1 kilogramo pesa 2.2 libras. En unidades métricas, la unidad de fuerza es el **newton**, que es igual a un poco menos que un cuarto de libra (como el peso de una hamburguesa cuarto de libra *después* de cocinarla). Un ladrillo de 1 kilogramo pesa aproximadamente 10 newtons (de manera más precisa, 9.8 N).[3]

Lejos de la superficie de la Tierra, donde la influencia de la gravedad es menor, un ladrillo de 1 kilogramo pesa menos. También pesaría menos sobre la superficie de los planetas con gravedad más débil que la Tierra. Sobre la superficie de la Luna, por ejemplo, donde la fuerza gravitacional sobre las cosas es sólo 1/6 de la que hay sobre la Tierra, un ladrillo de 1 kilogramo pesa aproximadamente 1.6 newtons (o 0.36 libras). En planetas con una gravedad mayor, pesaría más, pero la masa del ladrillo es la misma en todas partes. El ladrillo ofrece la misma resistencia a acelerar o frenar sin importar si el objeto está sobre la Tierra, sobre la Luna o sobre cualquier otro cuerpo que lo atraiga. En una nave espacial a la deriva, donde la lectura de una báscula con un ladrillo en ella indicaría cero, el ladrillo seguiría teniendo masa. Aun cuando no haga presión sobre la báscula, el ladrillo tiene la misma resistencia a cambiar de movimiento que tiene sobre la Tierra. Un astronauta tendría que ejercer la misma fuerza en la nave espacial para agitarlo atrás y adelante, que la necesaria para agitarlo atrás y adelante cuando está sobre la Tierra. Tanto en la Luna como en la Tierra tendrías que aplicar la misma cantidad de empuje para acelerar un enorme camión hasta cierta rapidez sobre una superficie a nivel. Sin embargo, la dificultad de *levantarlo* contra la gravedad (peso) es otra cosa. Masa y peso son diferentes entre sí (Figura 4.7).

Una buena demostración que distingue masa y peso es la bola masiva suspendida en una cuerda, como se muestra en la fotografía de entrada del Capítulo 2 y en la Figura 4.8. La cuerda superior se rompe cuando la cuerda inferior se jala con un aumento gradual de fuerza, pero la cuerda inferior se rompe cuando la cuerda inferior se tira con fuerza. ¿Cuál de estos casos destaca el peso de la bola y cuál destaca la masa de la bola? Observa que sólo la cuerda superior sostiene el peso de la bola. De modo que, cuando la cuerda inferior se jala de manera gradual, la tensión suministrada por el tirón se transmite hacia la cuerda superior. La tensión total en la cuerda superior es causada por el jalón *más* el peso de la bola. La cuerda superior se rompe cuando alcanza el punto de rotura. Pero, cuando la cuerda inferior se tira con fuerza, la masa de la bola, su tendencia a permanecer en reposo, se encarga de romper la cuerda inferior.

También es fácil confundir masa y volumen. Cuando se piensa en un objeto masivo, con frecuencia se piensa en un objeto grande. Sin embargo, el tamaño de un objeto (**volumen**) no necesariamente es un buen indicador de su masa. ¿Cuál es más fácil de poner en movimiento: una batería de automóvil o una caja de cartón vacía del mismo tamaño? Así pues, se observa que la masa no es ni peso ni volumen.

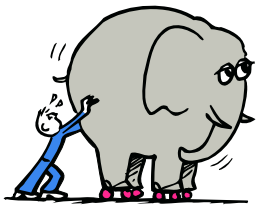


**FIGURA 4.9**
Cuanto mayor sea la masa, mayor debe ser la fuerza para lograr una aceleración dada.

[3]De modo que, 2.2 lb es igual a 9.8 N, o 1 N es aproximadamente igual a 0.22 lb, más o menos el peso de una manzana pequeña. En el sistema métrico se acostumbra especificar las cantidades de materia en unidades de masa (en gramos o kilogramos) y rara vez en unidades de peso (en newtons). No obstante, en Estados Unidos y países que usan el sistema británico de unidades, las cantidades de materia usualmente se especifican en unidades de peso (en libras). (La unidad británica de masa, el slug, no es bien conocida.) Consulta el Apéndice A para conocer más sobre los sistemas de medición.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Un ladrillo de hierro de 2 kg tiene el doble de *inercia* que un ladrillo de hierro de 1 kg? ¿El doble de *masa*? ¿El doble de *volumen*? ¿El doble de *peso*?**
2. **¿En cuál caso sería más fácil levantar un camión de cemento: sobre la superficie de la Tierra o sobre la superficie de la Luna?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Las respuestas a todas las partes es *sí*.
2. Sería más fácil levantar un camión de cemento en la Luna porque la fuerza gravitacional es menor sobre la Luna. Cuando *levantas* un objeto, luchas con la fuerza de gravedad (su peso). Aunque su masa es la misma en todas partes, su peso sólo es 1/6 sobre la Luna, de modo que sólo se necesita 1/6 de esfuerzo para levantarlo ahí. Sin embargo, para mover el camión horizontalmente sobre la Luna, no empujas contra la gravedad. Cuando la masa es el único factor, fuerzas iguales producirán iguales aceleraciones, ya sea que el objeto esté en la Tierra o en la Luna.

## La masa resiste la aceleración

Empuja a tu amigo sobre una patineta y tu amigo acelera. Ahora empuja igual de fuerte un elefante sobre una patineta y la aceleración es mucho menor. Verás que la cantidad de aceleración depende no sólo de la fuerza, sino también de la masa que se va a empujar. La misma fuerza aplicada al doble de masa produce la mitad de aceleración; para tres veces la masa, un tercio de aceleración. Se dice que, para una fuerza dada, la aceleración producida es inversamente proporcional a la masa; esto es,

$$\text{Aceleración} \sim \frac{1}{\text{masa}}$$

Por *inversamente* se entiende que los dos valores cambian en direcciones opuestas. Por ejemplo, si un valor se duplica, el otro valor se reduce a la mitad.

**FIGURA 4.10**
Se necesita una enorme fuerza para acelerar este volquete de tres pisos de alto cuando transporta una carga habitual de 350 ton. Además, se necesitan frenos de enorme fuerza para detenerlo.

## 4.4 Segunda ley de Newton de movimiento

Newton fue el primero en descubrir la relación entre tres conceptos físicos básicos: aceleración, fuerza y masa. Propuso una de las reglas más importantes de la naturaleza: su segunda ley de movimiento. La **segunda ley de Newton** afirma:

> **La aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre el objeto, está en la dirección de la fuerza neta y es inversamente proporcional a la masa del objeto.**

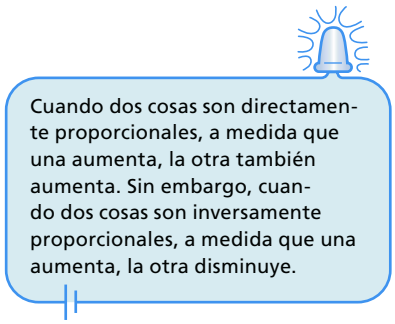
En forma resumida, esto es:

$$\text{Aceleración} \sim \frac{\text{fuerza neta}}{\text{masa}}$$

Se usa la línea ondulada $\sim$ como un símbolo que significa "es proporcional a". Se dice que la aceleración $a$ es directamente proporcional a la fuerza neta total $F$ e inversamente proporcional a la masa $m$. Por esto se entiende que, si $F$ aumenta, $a$ aumenta por el mismo factor (si $F$ se duplica, $a$ se duplica); pero si $m$ aumenta, $a$ disminuye por el mismo factor (si $m$ se duplica, $a$ se reduce a la mitad).

Al usar unidades consistentes, como newtons (N) para fuerza, kilogramos (kg) para masa y metros por segundo al cuadrado ($m/s^2$) para aceleración, la proporcionalidad puede expresarse como una ecuación exacta:

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{fuerza neta}}{\text{masa}}$$



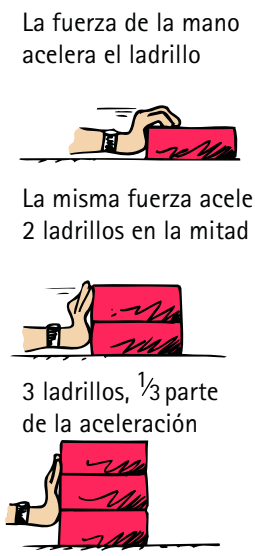



**FIGURA 4.11**
La aceleración es inversamente proporcional a la masa.

**VIDEO: Segunda ley de Newton**

**SCREENCAST: Segunda ley de Newton**

**SCREENCAST: Nellie en un elevador**

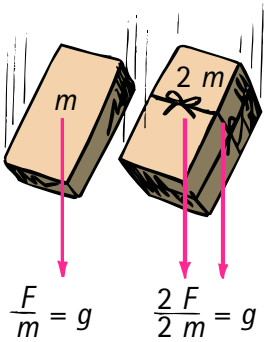



**FIGURA 4.12**
El cociente de la fuerza de gravedad ($F$) sobre la masa ($m$) es el mismo para todos los objetos en la misma ubicación; por tanto, sus aceleraciones son las mismas en ausencia de resistencia del aire.

En su forma más breve, donde $a$ es aceleración, $F_{neta}$ es fuerza neta y $m$ es masa, la ecuación se convierte en

$$a = \frac{F_{neta}}{m}$$

Un objeto acelera en la dirección de la fuerza que actúa sobre él. Aplicada en la dirección de movimiento del objeto, una fuerza aumentará la rapidez del objeto. Aplicada en la dirección opuesta, reducirá su rapidez. Aplicada en ángulos rectos, desviará al objeto. Cualquiera otra dirección de aplicación resultará en una combinación de cambio en rapidez y desviación. *La aceleración de un objeto siempre está en la dirección de la fuerza neta.*

**PUNTO DE CONTROL**

1. **En el Capítulo 3, la aceleración se definió como la tasa de cambio en el tiempo de la velocidad; esto es, *a* = (cambio en *v*)/tiempo. ¿En este capítulo se dice que la aceleración es la razón de fuerza a masa; esto es, *a* = *F*/*m*? ¿Qué es?**
2. **Un jumbo jet cruza con velocidad constante de 1,000 km/h cuando la fuerza de empuje de sus motores es 100,000 N constantes. ¿Cuál es la aceleración del jet? ¿Cuál es la fuerza de la resistencia del aire sobre el jet?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La aceleración se *define* como la tasa de cambio en el tiempo de la velocidad y se *produce* por una fuerza. La cantidad de fuerza/masa (la causa) determina la tasa de cambio en *v*/tiempo (el efecto). De modo que en este capítulo se definen los términos que producen aceleración.
2. La aceleración es cero porque la velocidad es constante. Dado que la aceleración es cero, de acuerdo con la segunda ley de Newton, la fuerza neta es cero, lo que significa que la fuerza de arrastre aerodinámico debe ser igual a la fuerza de empuje de 100,000 N y actúa en la dirección opuesta. De modo que el arrastre aerodinámico sobre el jet es 100,000 N. (Observa que no es necesario conocer la velocidad del jet. Sólo es necesario saber que la velocidad es constante, el indicio de que tanto la aceleración como la fuerza neta son cero.)

## 4.5 Cuando la aceleración es *g*: caída libre

Aunque Galileo introdujo los conceptos de inercia y aceleración, y fue el primero en medir la aceleración de los objetos que caen, no podía explicar *por qué* los objetos de diferentes masas caían con igual aceleración. La segunda ley de Newton ofrece la explicación.

Se sabe que un objeto que cae acelera hacia la Tierra debido al tirón gravitacional que la Tierra ejerce sobre él. Cuando la fuerza de gravedad es la única fuerza que actúa sobre el objeto —esto es, cuando la fricción (como la resistencia del aire) es despreciable— se dice que el objeto está en un estado de **caída libre**.

Cuanto mayor sea la masa de un objeto, mayor será la fuerza de atracción gravitacional entre él y la Tierra. El ladrillo doble de la Figura 4.12, por ejemplo, tiene el doble de atracción gravitacional del ladrillo solo. ¿Por qué, entonces, como supuso Aristóteles, el ladrillo doble no cae el doble de rápido? La respuesta es que la aceleración de un objeto no sólo depende de la fuerza, sino también de la resistencia del objeto al movimiento, su inercia. Mientras que una fuerza produce una aceleración, la inercia es una *resistencia* a la aceleración. De modo que el doble de fuerza ejercida sobre un objeto con el doble de inercia produce la misma aceleración que la mitad de la fuerza ejercida sobre un objeto con la mitad de inercia. Pero ambos aceleran de igual modo.

El símbolo de la aceleración debida a la gravedad es *g*. Se usa el símbolo *g*, en lugar de *a*, para denotar que la aceleración se debe únicamente a la gravedad.

La razón entre la fuerza gravitacional y la masa para objetos en caída libre es igual a una constante: *g*. Esto es similar a la razón constante entre la circunferencia y su diámetro para los círculos, que es igual a la constante π (Figura 4.13).

Ahora queda claro que la aceleración de caída libre es independiente de la masa de un objeto. Una roca 100 veces más masiva que un guijarro cae con la misma aceleración que el guijarro porque, aunque el tirón gravitacional sobre la roca es 100 veces mayor que la fuerza sobre el guijarro, la resistencia de la roca ante un cambio de movimiento (su masa) es 100 veces la del guijarro. La fuerza más grande compensa la masa igualmente más grande.

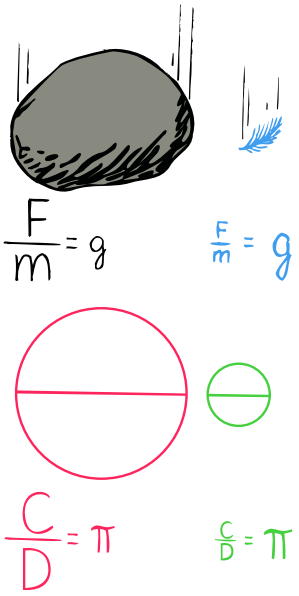



**FIGURA 4.13**
La razón entre la fuerza debida a la gravedad ($F$) y la masa ($m$) es la misma tanto para la piedra grande como para la pluma pequeña; de igual modo, la razón entre la circunferencia ($C$) y su diámetro ($D$) es la misma para círculos grandes como para pequeños.

**PUNTO DE CONTROL**

**En un vacío, una moneda y una pluma caen a la misma tasa, lado a lado. ¿Sería correcto decir que iguales fuerzas de gravedad actúan sobre la moneda y la pluma cuando están en un vacío?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

No, no, no, ¡mil veces no! Estos objetos aceleran de igual manera no porque las fuerzas de gravedad sobre ellos sean iguales, sino porque las *razones* entre fuerza y masa son iguales para cada uno. Aunque la resistencia del aire no esté presente en un vacío, la gravedad sí lo está. (Las naves espaciales que orbitan la Tierra en el vacío del espacio son aceleradas por la gravedad de la Tierra, por lo que no salen disparadas en línea recta.)

## 4.6 Cuando la aceleración es menor que *g*: caída no libre

Los objetos que caen en un vacío son una cosa, ¿pero qué ocurre con los casos prácticos de los objetos que caen en el aire? Si bien una pluma y una moneda caerán igualmente rápido en un vacío, caen de manera muy diferente en el aire. ¿Cómo se aplican las leyes de Newton a los objetos que caen en el aire? La respuesta es que las leyes de Newton se aplican a *todos* los objetos, ya sea que caigan libremente o caigan en presencia de fuerzas resistivas. Sin embargo, las aceleraciones son muy diferentes para los dos casos. Lo importante que debe tenerse en mente es la idea de *fuerza neta*. En un vacío, o en casos en los que puede despreciarse la resistencia del aire, la fuerza neta se debe solamente a la gravedad. Sin embargo, en presencia de resistencia del aire, la fuerza neta es menor que la fuerza de gravedad, debido a la fuerza de oposición que surge de la resistencia del aire.[4]

La fuerza de arrastre aerodinámico que experimenta un objeto que cae depende de dos cosas. Primero, depende del área frontal del objeto que cae; esto es: de la cantidad



**VIDEO: Explicación de la aceleración de caída libre**

Cuando Galileo intentó explicar por qué todos los objetos caen con igual aceleración, ¿no le habría encantado conocer la regla $a = F/m$?



**SCREENCAST: Unidades de aceleración**

[4]En notación matemática,

$$a = \frac{F_{\text{neta}}}{m} = \frac{mg - R}{m}$$

donde $mg$ es la fuerza debida a la gravedad y $R$ es la resistencia del aire. Observa que, cuando $R = mg$, $a = 0$; entonces, sin aceleración, el objeto cae con velocidad constante. Con álgebra elemental puedes avanzar un paso más y obtener

$$a = \frac{F_{\text{neta}}}{m} = \frac{mg - R}{m} = g - \frac{R}{m}$$

Vemos que la aceleración $a$ siempre será menor que $g$ si la resistencia del aire $R$ impide la caída. Sólo cuando $R = 0$, $a = g$.

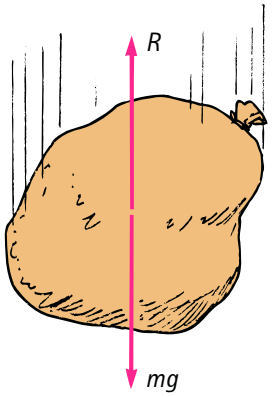



**FIGURA 4.14**
Cuando la fuerza debida a la gravedad *mg* es mayor que la resistencia del aire *R*, el costal de correo que cae acelera. A rapideces mayores, *R* aumenta. Cuando $R = mg$, la aceleración llega a cero, y el costal alcanza su velocidad terminal.

**VIDEO: Caída y resistencia del aire**

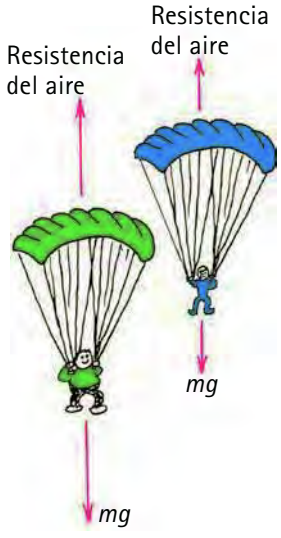



**FIGURA 4.15**
El paracaidista más pesado debe caer más rápido que el paracaidista más ligero porque la resistencia del aire cancela la mayor fuerza gravitacional que se ejerce sobre él.

de aire que el objeto debe hacer a un lado mientras cae. Segundo, depende de la rapidez del objeto que cae; cuanto mayor sea la rapidez, mayor será el número de moléculas de aire que un objeto encuentra por segundo y mayor la fuerza de impacto molecular. El arrastre aerodinámico depende del tamaño y la rapidez de un objeto que cae.

En algunos casos, el arrastre aerodinámico afecta enormemente la caída; en otros casos, no lo hace. El arrastre aerodinámico es importante para una pluma que cae. Puesto que el área de la pluma es mucha para un objeto al que la gravedad jala tan ligeramente, no tiene que caer muy rápido antes de que la resistencia del aire que actúa hacia arriba cancele la fuerza de gravedad que actúa hacia abajo. La fuerza neta sobre la pluma es entonces cero y la aceleración termina. Cuando la aceleración termina, se dice que el objeto llegó a su **rapidez terminal**. Si te interesa la dirección, que es hacia abajo para los objetos que caen, se dice que el objeto alcanzó su **velocidad terminal**.

La misma idea se aplica a todos los objetos que caen en el aire. Considera el paracaidismo. A medida que un paracaidista que cae gana rapidez, el arrastre aerodinámico finalmente puede incrementarse hasta que iguala la fuerza gravitacional sobre el paracaidista. Si la *fuerza neta* se vuelve cero, entonces el paracaidista ya no acelera; alcanzó su velocidad terminal. Para una pluma, la velocidad terminal es de unos cuantos centímetros por segundo, en tanto que para un paracaidista es de aproximadamente 200 kilómetros por hora. Un paracaidista puede variar esta rapidez si cambia su posición. Si cae con la cabeza o con los pies primero es una forma de encontrar menos aire y por ende menos arrastre aerodinámico y así lograr máxima velocidad terminal. Para lograr una velocidad terminal menor hay que extenderse como ardilla voladora.

Las velocidades terminales son mucho menores si el paracaidista usa un traje aéreo (*wingsuit*), como se muestra en la fotografía al comienzo de este capítulo. El traje aéreo no sólo aumenta el área frontal del paracaidista, sino que ofrece una sustentación similar a la que logran las ardillas voladoras cuando modelan sus cuerpos como "alas". Este nuevo y excitante deporte, el *vuelo con traje aéreo,* supera lo que pueden lograr las ardillas voladoras, pues un volador con traje aéreo puede alcanzar rapideces horizontales de más de 160 km/h (100 mph). Al parecer más como municiones voladoras que como ardillas voladoras, estas "personas aves" usan sus trajes aéreos de alto rendimiento para planear con una gran precisión. Para aterrizar de forma segura, se despliegan los paracaídas. Ha habido al menos un volador con traje aéreo que ha aterrizado de manera segura sin necesidad de desplegar el paracaídas.

La gran área frontal que proporciona un paracaídas produce rapideces terminales bajas que permitan aterrizajes seguros. Para entender la física de un paracaídas, considera un hombre y una mujer que saltan juntos desde la misma altitud (Figura 4.15). Supón que el hombre pesa el doble que la mujer y que sus paracaídas, del mismo tamaño, están inicialmente abiertos. Tener paracaídas del mismo tamaño significa que, a iguales rapideces, la resistencia del aire es la misma sobre los dos. ¿Quién llega primero al suelo: el hombre pesado o la mujer más ligera? La respuesta es que la persona que cae más rápido llega primero al suelo; esto es: la persona con la mayor rapidez terminal. Al principio puedes pensar que, dado que los paracaídas son iguales, las rapideces terminales para cada uno serían iguales y, por tanto, que ambos llegarían al suelo al mismo tiempo. Sin embargo, esto no ocurre porque el arrastre aerodinámico depende de la rapidez. Mayor rapidez significa mayor fuerza de impacto del aire. La mujer llegará a su rapidez terminal cuando el arrastre aerodinámico contra su paracaídas sea igual a la fuerza de gravedad que la jala hacia abajo. Cuando esto ocurra, el arrastre aerodinámico contra el paracaídas del hombre todavía no habrá alcanzado este equilibrio. Él debe caer más rápido que ella para que el arrastre aerodinámico iguale la mayor fuerza de gravedad sobre él.[5] La velocidad terminal es mayor para la persona más pesada, con el resultado de que la persona más pesada llega al suelo primero.

[5]La rapidez terminal para el hombre que es el doble de pesado será aproximadamente 41% mayor que la rapidez terminal de la mujer, porque la fuerza retardadora de la resistencia del aire es proporcional a la rapidez al cuadrado. Por tanto, el arrastre aerodinámico se vuelve más importante para las cosas que se mueven rápido, como los autos de carreras y los aviones.

**PUNTO DE CONTROL**

**Nellie Netwon salta en paracaídas desde un helicóptero a gran altura. A medida que cae más y más rápido por el aire, ¿su aceleración aumenta, disminuye o permanece igual?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La aceleración disminuye porque la fuerza neta sobre Nellie disminuye. La fuerza neta es igual a la fuerza de gravedad menos la resistencia del aire sobre ella, y dado que la resistencia del aire aumenta con rapidez creciente, la fuerza neta, y en consecuencia la aceleración, disminuye. Por la segunda ley de Newton,

$$a = \frac{f_{\text{neta}}}{m} = \frac{mg - R}{m}$$

donde $mg$ es la fuerza de gravedad y $R$ es la resistencia del aire que encuentra. A medida que $R$ aumenta, $a$ disminuye. Observa que si Nellie cae suficientemente rápido, de modo que $R = mg$, $a = 0$, entonces, al no tener aceleración, ella cae con rapidez constante.

**pti**

- Con la cabeza por delante y los brazos pegados al cuerpo, los paracaidistas pueden alcanzar rapideces terminales de aproximadamente 180 km/h (110 mph). Las rapideces terminales son menores con un traje aéreo y se reducen enormemente con un paracaídas.

**SCREENCAST: Problema de paracaidista**

Piensa en un par de pelotas de tenis: una de ellas es una pelota regular hueca; la otra está llena de perdigones de hierro. Aunque tienen el mismo tamaño, la pelota llena de hierro es mucho más pesada que la pelota regular. Si las sostienes por arriba de tu cabeza y las sueltas de manera simultánea, verás que golpean el suelo aproximadamente al mismo tiempo. Pero si las sueltas desde una altura mayor (por decir, desde lo alto de un edificio) observarás que la pelota más pesada golpea el suelo primero. ¿Por qué? En el primer caso, las pelotas no ganan mucha rapidez en su corta caída. El arrastre aerodinámico que encuentran es pequeño comparado con la fuerza de gravedad sobre ellas, incluso para la pelota regular. No se aprecia la pequeña diferencia en su tiempo de llegada. Pero cuando se sueltan desde más alto, las mayores rapideces de caída encuentran más resistencia del aire. A cualquier rapidez dada, cada pelota encuentra la misma resistencia del aire porque cada una tiene el mismo tamaño. Esta misma resistencia del aire puede ser mucha comparada con la menor fuerza gravitacional de la pelota más ligera, pero sólo poca comparada con la fuerza gravitacional de la pelota más pesada (como los paracaidistas de la Figura 4.15). Por ejemplo, 1 N de arrastre aerodinámico que actúa sobre un objeto de 2 N reducirá su aceleración a la mitad, pero 1 N de arrastre aerodinámico sobre un objeto de 200 N sólo disminuirá un poco su aceleración. De modo que, incluso con iguales resistencias del aire, las aceleraciones de cada uno son diferentes. Aquí debes aprender una moraleja. Siempre que consideres la aceleración de algo, usa la ecuación de la segunda ley de Newton para guiar tu razonamiento: la aceleración es igual a la razón de la fuerza *neta* entre la masa. En el caso de las pelotas de tenis que caen, la fuerza neta sobre la pelota hueca se reduce de manera considerable a medida que se incrementa el arrastre aerodinámico, en tanto que la fuerza neta sobre la pelota llena de hierro sólo se reduce un poco. La aceleración disminuye a medida que la fuerza neta se reduce, la que, a su vez, disminuye a medida que aumenta el arrastre aerodinámico. Cuando el arrastre aerodinámico se incrementa hasta igualar la fuerza gravitacional del objeto que cae, la fuerza neta se vuelve cero y la aceleración termina.

**FIGURA 4.16**
Estudio estroboscópico de una pelota de golf (izquierda) y una pelota de espuma de estireno (derecha) que caen en el aire. La resistencia del aire es despreciable para la bola de golf más pesada y su aceleración es casi igual a $g$. La resistencia del aire no es despreciable para la bola de espuma de estireno más ligera, que alcanza su velocidad terminal más pronto.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Fuerza.** Cualquier empuje o tirón ejercido sobre un objeto, medido en newtons (o en libras, en el sistema británico).

**Fricción.** Fuerza resistiva que se opone al movimiento o intento de movimiento de un objeto o que pasa a otro objeto con el que está en contacto o a través de un fluido.

**Masa.** Cantidad de materia en un objeto. De manera más específica, es la medida de la inercia o pereza que un objeto muestra en respuesta a cualquier esfuerzo realizado para ponerlo en movimiento, frenarlo, desviarlo o cambiar en alguna forma su estado de movimiento.

**Peso.** Fuerza sobre un objeto debida a la gravedad, mg. (De manera más general, la fuerza que un objeto ejerce sobre un medio de sostén.)

**Kilogramo.** Unidad fundamental del SI para la masa. Un kilogramo (símbolo kg) es la masa de 1 litro (1 L) de agua a 4 °C.

**Newton.** Unidad del SI para la fuerza. Un newton (símbolo N) es la fuerza que dará a un objeto de 1 kg de masa una aceleración de 1 $m/s^2$.

**Volumen.** Cantidad de espacio que ocupa un objeto.

**Segunda ley de Newton.** La aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre el objeto, está en la dirección de la fuerza neta y es inversamente proporcional a la masa del objeto.

**Caída libre.** Movimiento sólo bajo la influencia del tirón gravitacional.

**Rapidez terminal.** Rapidez a la que deja de acelerar un objeto que cae porque la resistencia del aire equilibra la fuerza gravitacional.

**Velocidad terminal.** Rapidez terminal con una dirección específica.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 4.1 La fuerza causa aceleración

1. ¿La aceleración es proporcional a la fuerza neta, o es igual a la fuerza neta?

### 4.2 Fricción

2. Cuando empujas horizontalmente una caja que está en un piso a nivel y no se desliza, ¿cuán grande es la fuerza de fricción sobre la caja?
3. A medida que aumentes tu empuje, ¿la fricción sobre la caja también aumentará?
4. Una vez que la caja se desliza, ¿cuán fuerte empujas para mantenerla en movimiento con velocidad constante?
5. ¿Por lo general cuál es mayor: la fricción estática o la resistencia al deslizamiento sobre el mismo objeto?
6. ¿Cómo varía con la rapidez la fuerza de fricción para un objeto que se desliza?
7. ¿La fricción de los fluidos varía con la rapidez?

### 4.3 Masa y peso

8. ¿Qué es más fundamental: la *masa* o el *peso*? ¿Cuál varía con la ubicación?
9. Llena los espacios: al agitar algo hacia atrás y hacia adelante mides su _____. Levántalo contra la gravedad y mides su _____.
10. Llena los espacios: la unidad del Sistema Internacional para la masa es _____. La unidad del Sistema Internacional para la fuerza es _____.
11. ¿Cuál es el peso aproximado de una hamburguesa de un cuarto de libra después de cocinarla?
12. ¿Cuál es el peso de un ladrillo de un kilogramo que descansa sobre una mesa?
13. En la ilustración de jalar la cuerda de la Figura 4.8, un jalón gradual de la cuerda inferior resulta en el rompimiento de la cuerda superior. ¿Esto ocurre debido al peso de la bola o a su masa?
14. En la ilustración de jalar la cuerda de la Figura 4.8, un rápido jalón sobre la cuerda inferior resulta en el rompimiento de la cuerda inferior. ¿Esto ocurre debido al peso de la bola o a su masa?
15. ¿La aceleración es *directamente* proporcional a la masa, o es *inversamente* proporcional a la masa? Da un ejemplo.

### 4.4 Segunda ley de Newton de movimiento

16. Enuncia la segunda ley de Newton de movimiento.
17. Si se dice que una cantidad es *directamente proporcional* a otra cantidad, ¿esto significa que son *iguales* entre sí? Explica brevemente usando masa y peso como ejemplo.
18. Si la fuerza neta que actúa sobre un bloque en deslizamiento se triplica de alguna forma, ¿qué sucede con la aceleración?
19. Si la masa de un bloque en deslizamiento se triplica mientras se aplica una fuerza neta constante, ¿en cuánto cambia la aceleración?
20. Si la masa de un bloque en deslizamiento se triplica de alguna forma al mismo tiempo que se triplica la fuerza neta sobre él, ¿cuál es la diferencia entre la aceleración resultante y la aceleración original?
21. ¿Cuál es la diferencia entre la dirección de la aceleración y la dirección de la fuerza neta que la produce?

### 4.5 Cuando la aceleración es *g*: caída libre

22. ¿Cuál es la condición para que un objeto experimente una *caída libre*?
23. La razón circunferencia/diámetro para todos los círculos es $\pi$. ¿Cuál es la razón fuerza/masa para cuerpos en caída libre?
24. ¿Por qué un objeto pesado no acelera más que un objeto ligero cuando ambos están en caída libre?

### 4.6 Cuando la aceleración es menor que *g*: caída no libre

25. ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre un objeto de 10 N en caída libre?
26. ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre un objeto de 10 N que cae, cuando encuentra 4 N de resistencia del aire? ¿10 N de resistencia del aire?
27. ¿Cuáles dos factores principales afectan la fuerza de la resistencia del aire sobre un objeto que cae?
28. ¿Cuál es la aceleración de un objeto que cae cuando alcanza su velocidad terminal?
29. ¿Por qué un paracaidista pesado cae más rápido que un paracaidista más ligero que usa un paracaídas del mismo tamaño?
30. Si dos objetos del mismo tamaño caen por el aire con diferentes rapideces, ¿cuál encuentra mayor resistencia del aire?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

31. Escribe una carta a la abuela y platícale de lo que aprendiste de Galileo, e introduce los conceptos de aceleración e inercia. Dile que conocía las fuerzas, pero que no vio su relación con la aceleración y la masa. Cuéntale cómo Isaac Newton sí vio la relación y cómo él explica por qué los objetos pesados y ligeros en caída libre adquieren la misma rapidez en el mismo tiempo. En esta carta está bien usar una ecuación o dos, en tanto dejes claro a la abuela que una ecuación es una notación abreviada de las ideas que le explicaste.
32. Suelta una hoja de papel y una moneda al mismo tiempo. ¿Cuál llega primero al suelo? ¿Por qué? Ahora arruga el papel en una pequeña bola apretada y nuevamente suéltala con la moneda. Explica la diferencia observada. ¿Caerán juntas si se sueltan desde la ventana de un segundo piso, tercero o cuarto? Haz la prueba y explica tus observaciones.
33. Suelta un libro y una hoja de papel y verás que el libro tiene una mayor aceleración: *g*. Repite, pero coloca el papel *debajo* del libro de modo que sea forzado contra el libro mientras ambos caen, de manera que ambos caen igualmente a *g*. ¿Cuál es la diferencia entre las aceleraciones si colocas el papel encima del libro elevado y luego sueltas ambos? Te puede sorprender, de modo que inténtalo y observa. Luego explica lo que observaste.
34. Suelta dos bolas de diferentes masas desde la misma altura y, a rapideces bajas, prácticamente caen juntas. ¿Rodarán juntas por el mismo plano inclinado? Si cada una se suspende de una cuerda de igual longitud y forman un par de péndulos que se desplazan a través del mismo ángulo, ¿se balancearán de ida y vuelta al unísono? Inténtalo y observa; luego explica usando las leyes de Newton.
35. La fuerza neta que actúa sobre un objeto y la aceleración resultante siempre están en la misma dirección. Puedes demostrar esto con un carrete. Si el carrete se jala suavemente en dirección horizontal hacia la derecha, ¿en cuál dirección rodará?

## SUSTITUYE Y LISTO (FAMILIARIZACIÓN CON ECUACIONES)

*Realiza estos cálculos simples de un solo paso y familiarízate con las ecuaciones que vinculan los conceptos de fuerza, masa y aceleración.*

**Peso = *mg***

36. Calcula el peso en newtons de una persona que tiene una masa de 50 kg.
37. Calcula el peso en newtons de un elefante de 2,000 kg.
38. Calcula el peso en newtons de un melón de 2.5 kg. ¿Cuál es su peso en libras?
39. Una manzana pequeña pesa alrededor de 1 N. ¿Cuál es su masa en kilogramos? ¿Cuál es su peso en libras?
40. Susie Small descubre que pesa 300 N. Calcula su masa.

$$\textbf{Aceleración: } a = \frac{F_{\text{neta}}}{m}$$

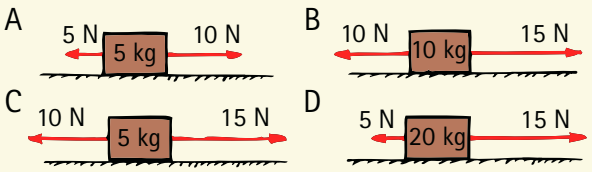
41. Calcula la aceleración de un avión de 2,000 kg con un solo motor mientras comienza a despegar con un empuje de motor de 500 N. (La unidad N/kg es equivalente a $m/s^2$.)
42. Calcula la aceleración de un jumbo jet de 300,000 kg justo antes de despegar, cuando el empuje sobre el avión es de 120,000 N.
43. Considera que tiran un bloque de cemento de 40 kg hacia un lado con una fuerza neta de 200 N. Demuestra que su aceleración es 5 $m/s^2$.
44. En el Capítulo 3 la aceleración se definió como $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$. Demuestra que la aceleración de un carro sobre un plano inclinado que gana 6.0 m/s cada 1.2 s es 5.0 $m/s^2$.
45. En este capítulo aprendiste que la causa de la aceleración está dada por la segunda ley de Newton: $a = \frac{F_{\text{neta}}}{m}$. Demuestra que la aceleración en el problema anterior es resultado de una fuerza neta de 15 N ejercida sobre un carro de 3 kg.
46. Si sabes que un objeto de 1 kg pesa 10 N, confirma que la aceleración de una piedra de 1 kg en caída libre es 10 $m/s^2$.
47. Un reordenamiento simple de la segunda ley de Newton produce $F_{\text{neta}} = ma$. Demuestra que se necesita una fuerza neta de 84 N ejercida sobre un paquete de 12 kg para producir una aceleración de 7 $m/s^2$.

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

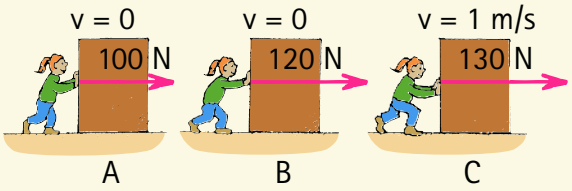
48. Una libra es lo mismo que 4.45 newtons. ¿Cuál es el peso en libras de 1 newton?
49. Si Lillian pesa 500 N, ¿cuál es su peso en libras?
50. Considera una masa de 1 kg acelerada 1 m/s$^2$ por una fuerza de 1 N. Demuestra que la aceleración sería la misma para una fuerza de 2 N que actúa sobre 2 kg.
51. Piensa en un jet comercial de 30,000 kg de masa en el despegue, cuando el empuje de cada uno de sus dos motores es 30,000 N. Demuestra que su aceleración es 2 m/s$^2$.
52. Alex, quien tiene una masa de 100 kg, patina a 9 m/s cuando choca contra una pared de ladrillos y llega a un alto total en 0.2 s.
    a. Demuestra que su desaceleración es 45 m/s$^2$.
    b. Demuestra que la fuerza de impacto es 4,500 N. (¡Ay!)
53. El autobús de una banda de rock, con masa $M$, acelera y se aleja de una señal de alto a una tasa $a$ cuando un trozo de metal pesado, con masa $M/5$, cae encima del autobús y permanece ahí.
    a. Demuestra que ahora la aceleración del autobús es $5/6a$.
    b. Si la aceleración inicial del autobús es 1.2 m/s$^2$, demuestra que, cuando el autobús transporte consigo el metal pesado, la aceleración será 1 m/s$^2$.

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

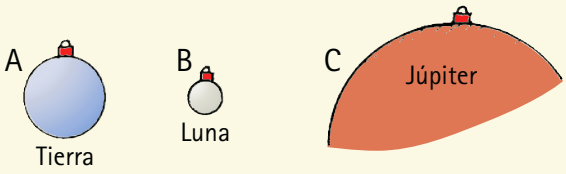
54. Hay cajas de varias masas sobre una mesa nivelada sin fricción. De mayor a menor, clasifica cada uno de los siguientes:



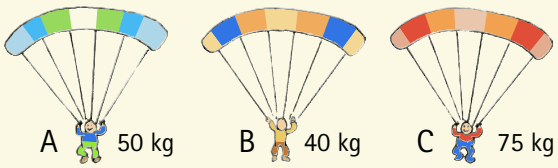

    a. Las fuerzas netas sobre las cajas.
    b. Las aceleraciones de las cajas.
55. En los tres casos, A, B y C, la caja está en equilibrio (no hay aceleración). De mayor a menor, clasifícalas por la cantidad de fricción entre la caja y el suelo.




56. Una caja de herramientas de 100 kg está en las ubicaciones A, B y C. De mayor a menor, clasifica:



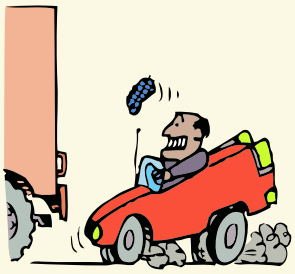

    a. las masas de la caja de herramientas de 100 kg.
    b. los pesos de la caja de herramientas de 100 kg.
57. Tres paracaidistas, A, B y C, alcanzaron cada uno velocidad terminal a la misma distancia arriba del suelo.




    a. Del más rápido al más lento, clasifica sus velocidades terminales.
    b. De los más largos a los más cortos, clasifica sus tiempos de llegada al suelo.

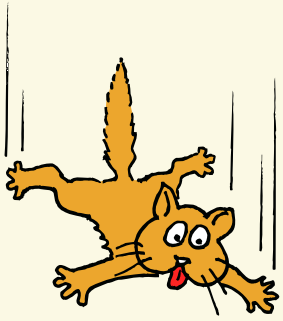
## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

58. Ejerces una fuerza sobre una bola cuando la lanzas hacia arriba. ¿Cuánto dura dicha fuerza después de que la bola abandona tu mano?
59. En una larga bolera, una bola de boliche frena mientras rueda. ¿Existe alguna fuerza horizontal que actúe sobre la bola? ¿Cómo lo sabes?
60. Si una motocicleta se mueve con una velocidad constante, ¿puedes concluir que no hay fuerza neta que actúe sobre ella? ¿Y si se mueve con aceleración constante?
61. Dado que un objeto pesa menos sobre la superficie de la Luna que sobre la superficie de la Tierra, ¿tiene menos inercia sobre la superficie de la Luna?
62. ¿Cuál contiene más manzanas: 1 bolsa de manzanas de 1 libra sobre la Tierra o una bolsa de manzanas de 1 libra sobre la Luna? ¿Cuál contiene más manzanas: una bolsa de manzanas de 1 kilogramo sobre la Tierra o una bolsa de manzanas de 1 kilogramo sobre la Luna?
63. Si el oro se vendiera por peso, ¿preferirías comprarlo en Denver o en Death Valley? Si se vendiera por masa, ¿cuál de estas ubicaciones produciría la mejor compra? Defiende tus respuestas.
64. En un vehículo espacial en órbita, te entregan dos cajas idénticas, una llena de arena y la otra llena de plumas. ¿Cómo puedes determinar cuál es cuál sin abrir las cajas?
65. Tu mano vacía no se lastima cuando golpea ligeramente contra una pared. ¿Por qué se lastima si llevas una carga pesada? ¿Cuál de las leyes de Newton es más aplicable aquí?
66. ¿La masa de un astronauta cambia cuando visita la Estación Espacial Internacional? Defiende tu respuesta.
67. ¿Por qué es más efectivo un cuchillo de carnicero masivo para cortar vegetales que un cuchillo con el mismo filo?
68. Cuando un automóvil chatarra se convierte en un cubo compacto, ¿su masa cambia? ¿Su peso? Explica.
69. La gravedad sobre la superficie de la Luna es sólo 1/6 la gravedad sobre la Tierra. ¿Cuál es el peso de un objeto de 10 kg sobre la Luna y sobre la Tierra? ¿Cuál es su masa en cada uno?
70. ¿Qué ocurre con el peso que indica una báscula sobre la que estás parado cuando lanzas hacia arriba un objeto pesado?
71. ¿Qué cambio ocurre en el peso cuando tu masa aumenta en 2 kg?
72. ¿Cuál es tu propia masa en kilogramos? ¿Tu peso en newtons?
73. Una bolsa de comestibles puede soportar 300 N de fuerza antes de romperse. ¿Cuántos kilogramos de manzanas puede soportar con seguridad?
74. Una caja permanece en reposo sobre el suelo de una fábrica mientras tú empujas sobre ella con una fuerza horizontal *F*. ¿Cuál es la fuerza de fricción ejercida sobre la caja por el suelo? Explica.
75. Explica cómo la primera ley de Newton de movimiento puede considerarse como una consecuencia de la segunda ley de Newton.
76. Cuando un automóvil se mueve en reversa, retrocediendo desde la entrada para el auto, el conductor aplica los frenos. ¿En qué dirección está la aceleración del automóvil?
77. El automóvil del dibujo se mueve hacia adelante mientras se aplican los frenos. Un transeúnte dice que, durante el intervalo de frenado, la velocidad y la aceleración del automóvil están en direcciones opuestas. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?



78. Aristóteles afirmó que la rapidez de un objeto que cae depende de su peso. Ahora sabes que los objetos en caída libre, cualesquiera sean las fuerzas gravitacionales sobre ellos, experimentan la misma ganancia de rapidez. ¿Por qué las diferencias en sus fuerzas gravitacionales no afectan sus aceleraciones?
79. Cuando bloquea en fútbol, un liniero defensivo con frecuencia trata de hacer que su cuerpo esté por abajo del cuerpo de su oponente y empujar hacia arriba. ¿Qué efecto tiene esto sobre la fuerza de fricción entre los pies del liniero que se oponen y el suelo?
80. Un automóvil de carreras viaja por una pista con una velocidad constante de 200 km/h. ¿Qué fuerza neta horizontal actúa sobre el automóvil?
81. Caída libre es el movimiento en el que la gravedad es la única fuerza que actúa. (a) ¿Un paracaidista que alcanza rapidez terminal está en caída libre? (b) ¿Un satélite arriba de la atmósfera, que da vueltas a la Tierra, está en caída libre?
82. Cuando una moneda se lanza hacia arriba, ¿qué sucede con su velocidad mientras asciende? ¿Con su aceleración? (Desprecia la resistencia del aire.)
83. ¿Cuánta fuerza actúa sobre una moneda lanzada cuando está a la mitad de su altura máxima? ¿Cuánta fuerza actúa sobre ella cuando llega a su pico? (Desprecia la resistencia del aire.)
84. ¿Cuál es la aceleración de una roca en la cima de su trayectoria cuando se lanza recto hacia arriba? (¿Tu respuesta es congruente con la segunda ley de Newton?)
85. Un amigo dice que, en tanto un automóvil esté en reposo, ninguna fuerza actúa sobre él. ¿Qué le dirías si tienes humor para corregir la afirmación de tu amigo?
86. Cuando tu automóvil avanza por la autopista con velocidad constante, la fuerza neta sobre él es cero. ¿Por qué, entonces, debes mantener en operación el motor?
87. ¿Cuál es la fuerza neta sobre una pequeña manzana de 1 N cuando la sostienes en reposo por arriba de tu cabeza? ¿Cuál es la fuerza neta sobre ella después de soltarla?
88. Una "estrella fugaz" por lo general es un grano de arena proveniente del espacio exterior que arde y produce luz mientras entra en la atmósfera. ¿Qué es exactamente lo que hace que arda?

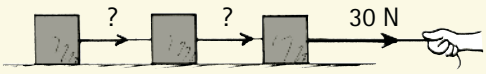
89. Una paracaidista, después de abrir su paracaídas, flota suavemente hacia abajo, sin ya adquirir rapidez. Ella siente el tirón ascendente del arnés, mientras la gravedad la jala hacia abajo. ¿Cuál de estas dos fuerzas es mayor? ¿O son iguales en magnitud?
90. ¿Cuál es la diferencia entre la fuerza de gravedad sobre una gota de lluvia y el arrastre aerodinámico que encuentra la gota cuando cae con velocidad constante?
91. Cuando un paracaidista abre su paracaídas después de alcanzar rapidez terminal, ¿en qué dirección acelera?
92. ¿Cuál es la diferencia entre la rapidez terminal de un paracaídas antes de abrirse y la rapidez terminal después de abrirlo? ¿Por qué existe diferencia?
93. ¿Cuál es la diferencia entre la fuerza gravitacional sobre un cuerpo que cae y la resistencia del aire que encuentra antes de alcanzar la velocidad terminal? ¿Después de alcanzar la velocidad terminal?
94. ¿Por qué un gato que accidentalmente cae de lo alto de un edificio de 50 pisos golpea una red de seguridad bajo él no más rápido que si cayera del piso 20?



95. ¿Bajo qué condiciones estaría en equilibrio una esfera metálica soltada a través de un líquido viscoso?
96. Cuando Galileo soltó dos bolas del mismo tamaño, pero con masas diferentes, desde lo alto de la torre inclinada de Pisa, la resistencia del aire realmente no era despreciable. ¿Cuál bola realmente golpeó el suelo primero? ¿Por qué?
97. Una pelota regular de tenis y otra llena de perdigones de plomo se sueltan al mismo tiempo desde lo alto de un edificio. ¿Cuál golpeará el suelo primero? ¿Cuál experimenta mayor resistencia del aire? Defiende tus respuestas.
98. En ausencia de resistencia del aire, si una bola se lanza verticalmente hacia arriba con cierta rapidez inicial, cuando regresa a su nivel original tendrá la misma rapidez. Cuando la resistencia del aire es un factor, ¿la bola se moverá más rápido, igual o más lentamente que su rapidez de lanzamiento cuando regresa al mismo nivel? ¿Por qué? (Con frecuencia, los físicos usan un "principio de exageración" que les ayuda a analizar un problema. Considera el caso exagerado de una pluma, no de una bola, porque el efecto de la resistencia del aire sobre la pluma es más pronunciado y, por tanto, más fácil de visualizar.)
99. Si una bola se lanza verticalmente al aire en presencia de resistencia del aire, ¿esperarías que el tiempo durante el cual se eleva sea mayor o menor que el tiempo durante el cual cae? (Usa de nuevo el principio de exageración.)
100. Formula dos preguntas de opción múltiple para comprobar que un compañero de clase entendió la diferencia entre masa y peso.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

101. Discute si la velocidad de un objeto puede o no invertir su dirección mientras mantiene una aceleración constante. Si es así, proporciona un ejemplo; si no, brinda una explicación.
102. Discute si es posible o no que una barra de dinamita contenga fuerza. En tu discusión haz la distinción entre *contiene* y *ejerce*.
103. ¿Es posible moverse en una trayectoria curva en ausencia de una fuerza? Discute por qué.
104. En la Luna, un astronauta suelta una roca por encima de su cabeza. Discute qué fuerza(s) actúa(n) sobre la roca cuando cae.
105. ¿Una persona que hace dieta busca perder masa o perder peso?
106. Piensa en una caja pesada que descansa sobre la cama de la plataforma de un camión. Cuando el camión acelera, la caja también acelera y permanece en su lugar. Identifica y discute la fuerza que acelera la caja.
107. Tres bloques idénticos se jalan, como se muestra, sobre una superficie horizontal sin fricción. Si la tensión en la soga sostenida por la mano es de 30 N, ¿cuál es la tensión en las otras sogas?




108. Para tirar de un carrito a través del pasto con velocidad constante, debes ejercer una fuerza constante. Discute y reconcilia este hecho con la primera ley de Newton, que dice que el movimiento con velocidad constante no requiere fuerza.
109. Hay un dicho que afirma: "no es la caída lo que te lastima; es la frenada súbita". Traduce esto a las leyes de movimiento de Newton.
110. Dibuja la trayectoria de una bola lanzada verticalmente en el aire. (Desprecia la resistencia del aire.) Dibuja la bola a la mitad del camino de subida, en la parte superior y a la mitad de su camino descendente hacia su punto de partida. Dibuja un vector de fuerza sobre la bola en las tres posiciones. ¿Los vectores son iguales o diferentes en las tres posiciones? ¿Las aceleraciones son iguales o diferentes en las tres posiciones?
111. Mientras saltas hacia arriba en un salto de pie, ¿cuál es la diferencia entre tu peso y la fuerza que ejerces sobre el suelo?
112. Cuando saltas verticalmente desde el suelo, ¿cuál es tu aceleración cuando alcanzas tu punto más alto? Discute esto a la luz de la segunda ley de Newton.
113. Discute si un objeto que cae aumenta en rapidez, o no, cuando disminuye su aceleración de caída.
114. ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre una bola de 1 kg en caída libre?
115. ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre una bola de 1 kg que cae, si encuentra 2 N de resistencia del aire?
116. Un compañero de discusión dice que, antes de que la bola que cae en el ejercicio anterior llegue a velocidad terminal *adquiere* rapidez mientras su aceleración *disminuye*. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo? Defiende tu respuesta.
117. Explica a otros si una hoja de papel cae más lentamente, o no, que una que se estruja en una bola.
118. ¿Sobre cuál la resistencia del aire será mayor: una hoja de papel que cae o la misma hoja apretada en una bola que cae con una rapidez terminal mayor? (¡Cuidado!)
119. Supón que sostienes una bola de ping-pong y una pelota de golf a la altura de los brazos y las sueltas simultáneamente. Las verás golpear el suelo aproximadamente al mismo tiempo. Pero, si las sueltas desde lo alto de una gran escalera, verás que la pelota de golf golpea primero. ¿Cuál es tu explicación?
120. Un oso de 400 kg que se sujeta a un árbol vertical se desliza con velocidad constante. ¿Cuál es la fuerza de fricción que actúa sobre el oso? Discute cómo la "velocidad constante" es la clave para tu respuesta.
121. Cuando Nellie la paracaidista abre su paracaídas, el arrastre aerodinámico que empuja el paracaídas hacia arriba es más fuerte que la fuerza de gravedad de la Tierra que la jala a ella hacia abajo. Uno de tus amigos dice que esto significa que ella debe comenzar a moverse hacia arriba. Discute con tu amigo por qué esto no es así y qué es lo que sí ocurre.

5

CAPÍTULO 5

# Tercera ley de Newton de movimiento

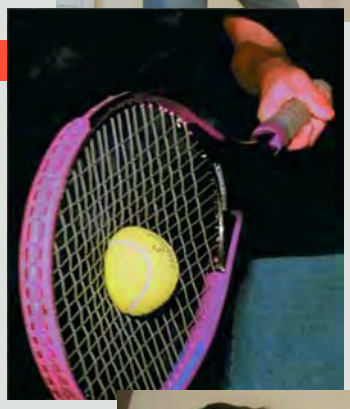

5.1 Fuerzas e interacciones

5.2 Tercera ley de Newton de movimiento

5.3 Acción y reacción sobre masas diferentes

5.4 Vectores y la tercera ley

5.5 Resumen de las tres leyes de Newton



**1** Darlene Librero jala con un dedo; Paul Doherty jala con ambas manos. ¿Quién ejerce más fuerza sobre el dinamómetro? **2** La raqueta no puede golpear la bola a *menos que* la bola golpee de manera simultánea la raqueta, ¡es la ley! **3** Toby y Bruna Jacobson, un matrimonio de físicos, empujan sobre un par de básculas de baño. ¿Cuál lectura de báscula es mayor? **4** ¿Paul toca a su hija Gracie, o Gracie toca a su papá? La tercera ley de Newton dice que ambos: tú no puedes tocar sin ser tocado.

Durante casi 20 fascinantes años he impartido el curso de física conceptual los miércoles en la noche en el Exploratorium de San Francisco, curso que se enriqueció enormemente con la presencia de su fundador, Frank Oppenheimer, quien con frecuencia se sentaba en mi clase. Cuando Frank murió, otro gran físico tomó su lugar en las visitas al aula, Paul Doherty, a quien tuve el orgullo de recomendar para su contratación en el Exploratorium. Paul Doherty es tan amable y sin duda tan brillante como Frank, y como Frank podía enseñar ¡*realmente* enseñar! ¡Me siento muy honrado de haber trabajado con estas dos personas tan especiales!

Paul llegó a ser el principal científico del Exploratorium. Siempre que me quedaba perplejo con algún problema de física, Paul estaba ahí con respuestas. Su comprensión maravillosamente profunda de la física explica sus muchos premios y fue acaso por ello por lo que obtuvo su doctorado del MIT en sólo cuatro años.

Paul Doherty es físico, profesor, autor y escalador, y destaca en todo ello. Ha escrito numerosos artículos para publicaciones del Exploratorium, principalmente el Exploratorium Science Snackbook, valorado por los profesores de ciencias de todo el mundo quienes adoran tener los "secretos" de las exposiciones Exploratorium revelados con tanta claridad. El tema de todos los libros de Paul son sus aventuras en física.

Paul es un artista consumado que realiza actuaciones de física en reuniones profesionales, tanto en su país como en el extranjero. Demostró la fascinación que ejerce la física ante millones de personas en el *Late Show with David Letterman*. La fotografía muestra cómo, después de golpear el extremo de una barra de aluminio para hacerla sonar, Paul presiona la barra entre los dedos para imponer un nodo y elegir una frecuencia.

Sus escaladas en roca han llevado a Paul de Yosemite, lugar que visita con frecuencia, al Tíbet y a montañas de más de 6,000 metros de altura en la frontera entre Chile y Argentina. Sus actividades a menor altitud incluyen hacer física en la Antártida.

Es fantástico para nuestra profesión que el talento de Paul para enseñar se extienda hasta su Exploratorium Teacher Institute de verano, donde le gusta trabajar con profesores de física. Paul describe de una hermosa manera el vínculo que ve entre científicos, profesores y estudiantes: "Los científicos observan el mundo y ven cosas que nadie más ha visto. Los profesores ayudan a los alumnos a ver las cosas que nunca han visto. Los alumnos plantean preguntas que ayudan a los profesores a ver las cosas que nunca han visto". Paul Doherty es profesor de física para todos los tiempos.

## 5.1 Fuerzas e interacciones

Hasta el momento se ha abordado la fuerza en su sentido más simple: como un empujón o un tirón. Sin embargo, ningún empujón o tirón ocurre solo. Toda fuerza es parte de una *interacción* entre una cosa y otra. Cuando empujas una pared con los dedos, sucede algo más que tu empuje sobre la pared. Tú interactúas con la pared, la que también te empuja de vuelta. Esto es evidente en tus dedos doblados, como se ilustra en la Figura 5.1. Hay un par de fuerzas involucradas: tu empuje sobre la pared y la pared que te empuja de vuelta. Estas fuerzas son iguales en magnitud (tienen la misma intensidad) y opuestas en dirección, y constituyen una sola interacción. De hecho, no puedes empujar la pared *a menos que* la pared te empuje a ti.[1]

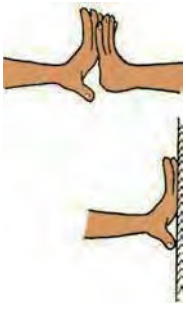


**FIGURA 5.1**
Puedes sentir cómo los dedos de tu amigo empujan los tuyos. También sientes la misma cantidad de fuerza cuando empujas una pared y ella te empuja de vuelta. De hecho, ¡no puedes empujar la pared *a menos que* la pared te empuje de vuelta!

**FIGURA 5.2**
Cuando te recargas contra una pared, ejerces una fuerza sobre la pared. La pared, simultáneamente, ejerce una fuerza igual y opuesta sobre ti. Por tanto, no te caes.

[1]Uno tiende a pensar que sólo las cosas vivas son capaces de empujar y tirar, pero las cosas inanimadas pueden hacer lo mismo. Así que, por favor, no te preocupes con la idea de la pared inanimada que empuja sobre ti. Lo hace, tal como lo haría otra persona que se recargue contra ti.

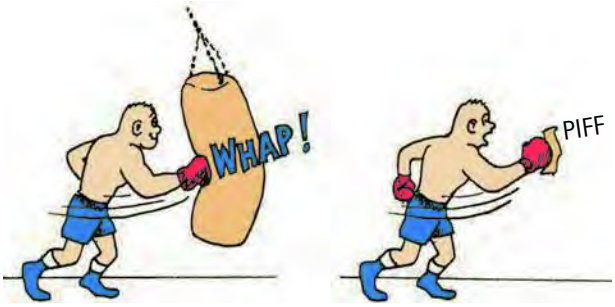



**FIGURA 5.3**
El boxeador puede golpear el gran saco con mucha fuerza. Pero con el mismo golpe sólo puede ejercer una fuerza muy pequeña sobre el papel de seda a mitad del aire.

Piensa en el puño de un boxeador que golpea un gran saco de boxeo. El puño golpea el saco (y lo abolla) al tiempo que el saco golpea de vuelta el puño (y detiene su movimiento). Al golpear el saco intervienen un par de fuerzas. El par de fuerzas puede ser muy grande. Pero, ¿si se golpea un papel de seda, como se muestra en la Figura 5.3? El puño del boxeador sólo puede ejercer la misma cantidad de fuerza sobre el papel de seda que la que el papel de seda ejerce sobre el puño. Es más: el puño no puede ejercer ninguna fuerza en absoluto a menos que lo que va a golpear ejerza la misma cantidad de fuerza en reciprocidad. Una interacción requiere que un *par* de fuerzas actúen sobre *dos* objetos independientes.

Otros ejemplos: tiras de una soga unida a un carrito y ocurre aceleración. Cuando jalas, el carrito te jala de vuelta, como se demuestra, tal vez por la tensión de la soga enredada en tu mano. Un martillo golpea una estaca y la clava en el suelo. La estaca ejerce una cantidad igual de fuerza sobre el martillo, lo que lleva al martillo a una detención abrupta. Una cosa interactúa con otra: tú con el carrito, y el martillo con la estaca.

¿Cuál ejerce la fuerza y cuál recibe la fuerza? La respuesta de Isaac Newton fue que ninguna fuerza debe identificarse como "ejecutora" o "receptora"; concluyó que ambos objetos deben tratarse por igual. Por ejemplo, cuando tiras del carrito, el carrito tira de ti. Este par de fuerzas, tu tirón sobre el carrito y el tirón del carrito sobre ti, constituyen la única interacción entre tú y el carrito. De igual modo, el par de fuerzas ejercidas sobre el martillo y la estaca constituyen una sola interacción. Tales observaciones condujeron a Newton a su tercera ley de movimiento.

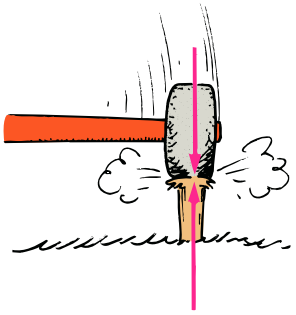


**FIGURA 5.4**
En la interacción entre el martillo y la estaca, cada uno ejerce la misma cantidad de fuerza sobre el otro.

## 5.2 Tercera ley de Newton de movimiento

La **tercera ley de Newton** dice:

**Siempre que un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, el segundo objeto ejerce una fuerza igual y opuesta sobre el primero.**

A una fuerza se le puede llamar *fuerza de acción* y a la otra *fuerza de reacción.* Entonces, la tercera ley de Newton se puede expresar de esta forma:

**Por cada acción existe siempre una reacción igual y opuesta.**

No importa a cuál fuerza se le llame *acción* y a cuál se le llame *reacción.* Lo importante es que son copartícipes de una sola interacción y que una fuerza no existe sin la otra.

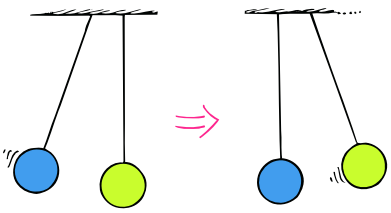
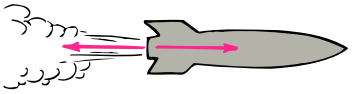


**FIGURA 5.5**
Las fuerzas de impacto entre la bola azul y la bola amarilla mueven la bola amarilla y detienen la bola azul.

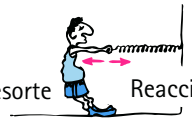
Cuando caminas, interactúas con el suelo. Tus pies empujan contra el suelo y el suelo empuja contra tus pies. Las dos fuerzas ocurren al mismo tiempo (son *simultáneas*). Del mismo modo, las llantas de un automóvil empujan contra el camino al tiempo que el camino empuja de vuelta sobre las llantas: las llantas y el camino se empujan simultáneamente uno contra las otras. Cuando nadas, interactúas con el agua; empujas el agua hacia atrás al tiempo que el agua simultáneamente te empuja hacia adelante: tú y el agua se empujan una contra el otro. Las fuerzas de reacción son lo que explica el movimiento en estos ejemplos. Dichas fuerzas dependen de la fricción; es probable que una persona o un automóvil sobre el hielo, por ejemplo, no puedan ejercer la fuerza de acción para producir la fuerza de reacción necesaria. Las fuerzas ocurren en *pares de fuerza.* Ninguna fuerza existe sin la otra.

**FIGURA 5.6**
En la interacción entre el automóvil y el camión, ¿la fuerza de impacto es la misma sobre cada uno? ¿El daño es el mismo?

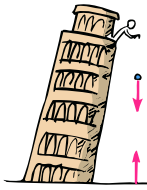
Acción: las llantas empujan sobre el camino Reacción: el camino empuja sobre las llantas



Acción: el cohete empuja sobre el gas Reacción: el gas empuja sobre el cohete



Acción: el hombre tira sobre el resorte Reacción: el resorte tira sobre el hombre



Acción: la Tierra tira sobre la bola

Reacción: la bola tira sobre la Tierra

**FIGURA 5.7**
Fuerzas de acción y reacción. Observa que, cuando la acción es "A ejerce fuerza sobre B", la reacción es simplemente "B ejerce fuerza sobre A".

**VIDEO: Fuerzas e interacción**

**SCREENCAST: Leyes de Newton de movimiento**

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Un misil que acelera posee fuerza?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

No: una fuerza no es algo que un objeto *tenga,* como la masa, sino que es parte de una interacción entre un objeto y otro. Un misil que acelera posee la capacidad de ejercer una fuerza sobre otro objeto cuando ocurre una interacción, pero no posee fuerza como una cosa en sí. Como verás en los siguientes capítulos, un misil que acelera posee cantidad de movimiento y energía cinética.

## Define tu sistema

Con frecuencia surge una pregunta interesante: dado que las fuerzas de acción y reacción son iguales y opuestas, ¿por qué no se cancelan a cero? Para responder esta pregunta, debes tener en cuenta el *sistema* involucrado. Considera el sistema que consiste en una sola naranja en la Figura 5.8. La línea punteada que rodea la naranja encierra y define el sistema. El vector que sale de la línea punteada representa una fuerza externa sobre el sistema. El sistema acelera en concordancia con la segunda ley de Newton. En la Figura 5.9, se observa que esta fuerza la proporciona una manzana, lo que no cambia el análisis. La manzana está afuera del sistema. El hecho de que la naranja simultáneamente ejerza una fuerza sobre la manzana, que es externa al sistema, puede afectar a la manzana (otro sistema), mas no a la naranja. No puedes cancelar una fuerza sobre la naranja con una fuerza sobre la manzana. Así que, en este caso, las fuerzas de acción y reacción no se cancelan.

**FIGURA 5.8**
Una fuerza actúa sobre la naranja, y la naranja acelera hacia la derecha.

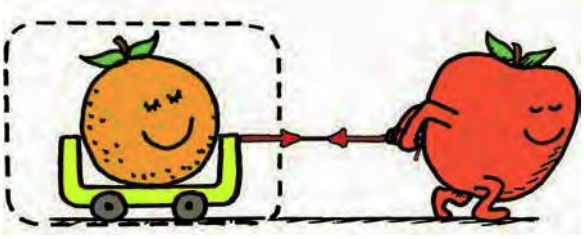


**FIGURA 5.9**
La fuerza sobre la naranja, proporcionada por la manzana, no se cancela con la fuerza de reacción sobre la manzana. Aun así, la naranja acelera.

Un sistema puede ser tan pequeño como un átomo o tan grande como el Universo.

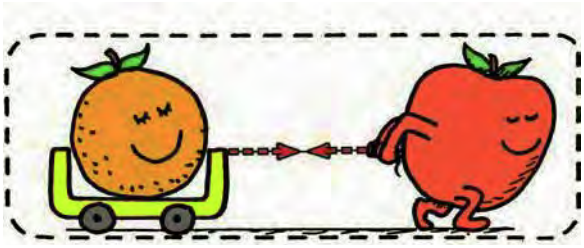


**FIGURA 5.10**
En el sistema más grande de naranja + manzana, las fuerzas de acción y reacción son internas y se cancelan. Si éstas son las únicas fuerzas horizontales, sin fuerza externa no ocurre aceleración del sistema.

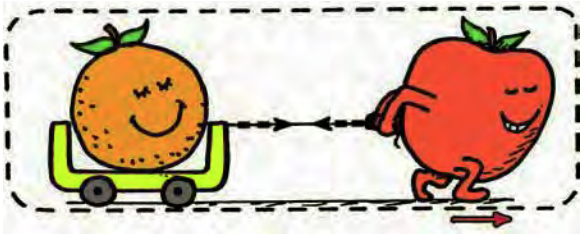


**FIGURA 5.11**
Una fuerza horizontal externa ocurre cuando el piso empuja sobre la manzana (reacción al empuje de la manzana sobre el suelo). El sistema naranja-manzana acelera.

Ahora piensa en un sistema más grande, que encierra *tanto* a la naranja *como* a la manzana. Observa el sistema acotado por la línea punteada en la Figura 5.10. Observa que el par de fuerzas es *interno* al sistema naranja-manzana. Entonces, dichas fuerzas *sí* se cancelan mutuamente. No tienen ninguna función en la aceleración del *sistema*. Se necesita una fuerza externa al sistema para la aceleración. Es ahí donde la fricción con el suelo desempeña una función (Figura 5.11). Cuando la manzana empuja contra el suelo, el suelo simultáneamente empuja sobre la manzana, una fuerza externa sobre el sistema. El sistema acelera hacia la derecha.

En el interior de un balón de fútbol hay billones y billones de fuerzas interatómicas en juego. Mantienen unido el balón, pero no tienen ninguna función en la aceleración del balón. Aunque cada una de las fuerzas interatómicas es parte de un par acción-reacción dentro del balón, su combinación es cero, sin importar cuántas de ellas existan. Para acelerarlo, es necesaria una fuerza externa al balón, como una patada. En la Figura 5.12 se observa una sola interacción entre el pie y el balón de fútbol.

Sin embargo, el balón de la Figura 5.13 no acelera. En este caso ocurren dos interacciones: dos fuerzas actúan sobre el balón. Si son simultáneas, iguales y opuestas, entonces la fuerza neta es cero. ¿Las dos patadas opuestas conforman un par acción-reacción? No, porque actúan sobre el mismo objeto, no sobre objetos diferentes. Pueden ser iguales y opuestas, pero, a menos que actúen sobre diferentes objetos, no son un par acción-reacción. ¿Comprendes?

Si esto te parece confuso, es bueno saber que el mismo Newton tuvo dificultades con la tercera ley.

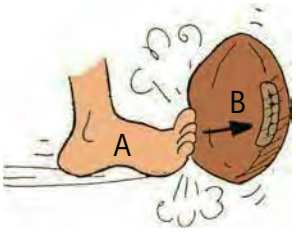



**FIGURA 5.12**
A actúa sobre B, y B acelera.

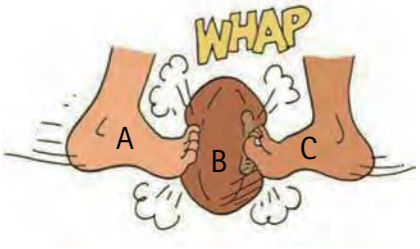



**FIGURA 5.13**
Tanto A como C actúan sobre B. Pueden cancelarse mutuamente. Si lo hacen, B no acelera.

## PUNTO DE CONTROL

1. **En un día frío y lluvioso, te encuentras en el automóvil con una batería descargada. Debes empujar el automóvil para moverlo y echarlo a andar. ¿Por qué no puedes mover el automóvil si permaneces cómodamente sentado en su interior y empujas contra el tablero?**
2. **¿Por qué un libro que reposa sobre una mesa nunca acelera "espontáneamente" en respuesta a los billones de fuerzas interatómicas que actúan dentro de él?**
3. **Se sabe que la Tierra tira sobre la Luna. Entonces, ¿la Luna también tira sobre la Tierra?**
4. **¿Puedes identificar las fuerzas de acción y reacción en el caso de un objeto que cae en el vacío?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. En este caso, el sistema que se debe acelerar es el automóvil. Si permaneces en el interior y empujas sobre el tablero, el par de fuerzas que produces actúa y reacciona dentro del sistema. Dichas fuerzas se cancelan en lo que respecta a cualquier movimiento del automóvil. Para acelerar el automóvil, debe haber una interacción entre el automóvil y algo externo, por ejemplo, tú en el exterior empujando contra el camino y sobre el automóvil.
2. Cada una de estas fuerzas interatómicas es parte de un par acción-reacción en el interior del libro. Dichas fuerzas suman cero, sin importar cuántas fuerzas existan. Eso es lo que hace que la *primera* ley de Newton se aplique al libro. El libro tiene aceleración cero a menos que una fuerza *externa* actúe sobre él.
3. Sí, ambos jalones constituyen un par de fuerzas acción-reacción asociadas a la interacción gravitacional entre la Tierra y la Luna. Es posible decir que (a) la Tierra tira sobre la Luna y (b) la Luna, del mismo modo, tira sobre la Tierra, pero es más ilustrador pensar que esto es una sola interacción: tanto la Tierra como la Luna tiran simultáneamente una sobre la otra, cada una con la *misma* cantidad de fuerza. No puedes empujar o tirar sobre algo a menos que algo empuje o tire simultáneamente sobre ti. ¡Ésa es la ley!
4. Para identificar un par de fuerzas acción-reacción en cualquier situación, identifica primero el par de objetos en interacción involucrados: el cuerpo A y el cuerpo B. El cuerpo A, el objeto que cae, interactúa (gravitacionalmente) con el cuerpo B, toda la Tierra. De modo que la Tierra tira hacia abajo sobre el objeto (llámala acción), en tanto el objeto tira hacia arriba sobre la Tierra (reacción).

**VIDEO: Acción y reacción sobre diferentes masas**

**VIDEO: Acción y reacción sobre un rifle y una bala**

## 5.3 Acción y reacción sobre masas diferentes

Por extraño que pueda parecer al principio, un objeto que cae tira hacia arriba sobre la Tierra con tanta fuerza como la Tierra tira hacia abajo sobre el objeto. La aceleración resultante del objeto que cae es evidente, en tanto que la aceleración ascendente de la Tierra es muy pequeña para detectarse. Así que, hablando estrictamente, cuando bajas de una acera, la calle se eleva muy ligeramente para encontrarte.

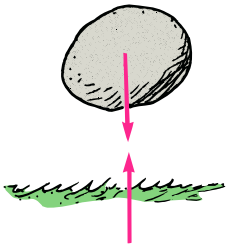


**FIGURA 5.14**
La roca tira hacia arriba a la Tierra con tanta fuerza como la Tierra tira hacia abajo a la roca.

Puedes ver que la Tierra acelera ligeramente en respuesta a un objeto que cae si consideras los ejemplos exagerados de dos cuerpos planetarios, los incisos del (a) al (e) de la Figura 5.15. Las fuerzas entre los cuerpos A y B son iguales en magnitud y con dirección opuesta *en cada* caso. Si la aceleración del planeta A no es apreciable en (a), entonces es más apreciable en (b), donde la diferencia entre las masas es menos extrema. En (c), donde ambos cuerpos tienen igual masa, la aceleración del objeto A es tan evidente como lo es para B. A continuación, se observa que la aceleración de A se vuelve aún más evidente en (d) e incluso más en (e).

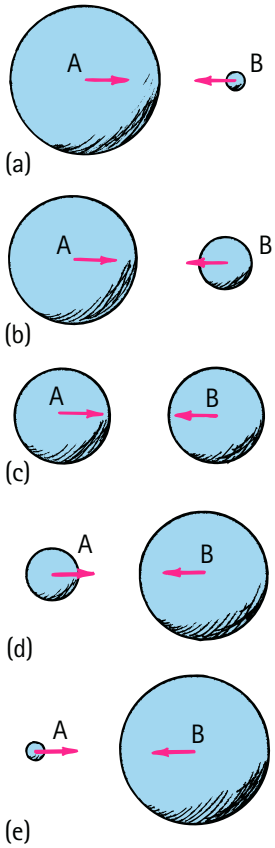



**FIGURA 5.15**
¿Cuál cae hacia el otro: A o B? Aunque las fuerzas entre cada par son las mismas, ¿las aceleraciones difieren?

La función de diferentes masas es evidente en un cañón que dispara. Cuando un cañón se dispara, hay una interacción entre el cañón y la bala de cañón (Figura 5.16). Un par de fuerzas actúa sobre el cañón y la bala de cañón. La fuerza ejercida sobre la bala de cañón es tan grande como la fuerza de reacción ejercida sobre el cañón; en consecuencia, el cañón recula. Dado que las fuerzas son iguales en magnitud, ¿por qué el cañón no recula con la misma rapidez que la bala de cañón?

**SCREENCAST: Tercera ley de Newton**

**SCREENCAST: Problema de la ley de Newton**

**FIGURA 5.17**
El globo recula del aire que escapa y se mueve hacia arriba.

**FIGURA 5.18**
El cohete recula de las "balas de cañón moleculares" que dispara y se mueve hacia arriba.

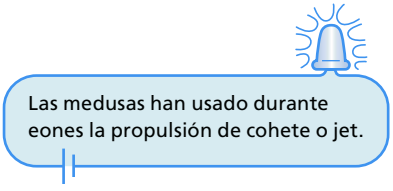
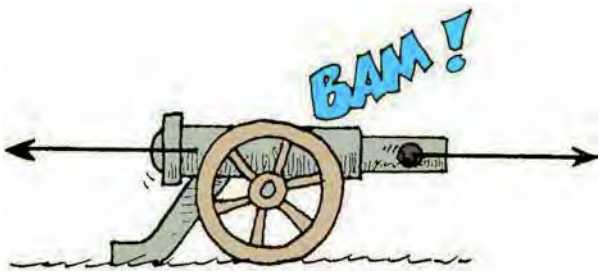



**FIGURA 5.16**
La fuerza ejercida contra el cañón que recula es tan grande como la fuerza que impulsa la bala de cañón dentro del barril. ¿Por qué, entonces, la bala de cañón acelera más que el cañón?




Cuando analizas cambios de movimiento, la segunda ley de Newton te recuerda que también debes considerar las masas involucradas. Supón que $F$ representa tanto la fuerza de acción como la de reacción, $m$ la masa de la bala de cañón y $M$ la masa del cañón mucho más masivo. Entonces, para encontrar las aceleraciones de la bala de cañón y del cañón se comparan las razones de fuerza a masa:

$$\text{Bala de cañón: } \frac{F}{m} = a$$

$$\text{Cañón: } \frac{F}{M} = a$$

Esto muestra por qué el cambio de velocidad de la bala de cañón es tan grande comparado con el cambio de velocidad del cañón. Una fuerza dada ejercida sobre una masa pequeña produce una gran aceleración, en tanto que la misma fuerza ejercida sobre una masa grande produce una aceleración pequeña.

En el ejemplo del objeto que cae, si usas símbolos igualmente exagerados para representar la aceleración de la Tierra que reacciona ante un objeto que cae, el símbolo $m$ para la masa de la Tierra sería de tamaño astronómico. La fuerza $F$ debida a la gravedad del objeto que cae dividida entre esta gran masa resultaría en una $a$ microscópica que representaría la aceleración de la Tierra hacia el objeto que cae.

Puedes extender la idea de un cañón que recula de la bala que dispara para comprender la propulsión de cohetes. Piensa en un globo inflado que retrocede cuando expulsa aire (Figura 5.17). Si el aire se expulsa hacia abajo, el globo acelera hacia arriba. El mismo principio se aplica a un cohete, que "recula" continuamente del gas de escape expulsado. Cada molécula de gas de escape es como una pequeña bala de cañón disparada desde el cohete (Figura 5.18).

Una idea equivocada que suele tenerse es que un cohete es impulsado por el impacto de los gases de escape contra la atmósfera. De hecho, antes de la llegada de los cohetes, por lo general se pensaba que enviar un cohete a la Luna era imposible. ¿Por qué? Porque no hay aire sobre la atmósfera de la Tierra sobre el cual empujar el cohete. Pero esto es como decir que un cañón no recularía a menos que la bala de cañón tuviera aire sobre el cual empujar. ¡No es cierto! Tanto el cohete como el cañón que recula aceleran debido a las fuerzas de reacción ejercidas por el material que disparan, no debido a algún empuje sobre el aire. De hecho, un cohete opera mejor fuera de la atmósfera, donde no hay resistencia del aire.

Con la tercera ley de Newton puedes entender cómo un helicóptero consigue su fuerza de sustentación. Las aspas que giran tienen la forma adecuada para forzar hacia abajo (acción) las partículas de aire, y el aire fuerza las aspas hacia arriba (reacción). Esta fuerza de reacción ascendente se llama *sustentación*. Cuando la sustentación es igual a la fuerza debida a la gravedad sobre la aeronave, el helicóptero flota en el aire. Cuando la sustentación es mayor, el helicóptero asciende.

Esto es válido para aves y aviones. Para volar, las aves empujan el aire hacia abajo. A su vez, el aire empuja el ave hacia arriba. Cuando el ave asciende, las alas deben adquirir una forma tal que desvíen hacia abajo las partículas de aire que mueven. Las alas ligeramente inclinadas que desvían hacia abajo el aire entrante producen sustentación en un avión. El aire que se empuja hacia abajo de manera continua mantiene

la sustentación. Este suministro de aire se obtiene con el movimiento hacia adelante de la aeronave, que resulta de las hélices o motores que empujan el aire hacia atrás. El aire, a su vez, empuja las hélices o motores hacia adelante. En el Capítulo 14 aprenderás que la superficie curva de un ala es una superficie sustentadora, que aumenta la fuerza de sustentación.

Puedes ver la tercera ley de Newton en acción en todas partes. Un pez empuja el agua hacia atrás con sus aletas y el agua empuja al pez hacia adelante. Cuando el viento empuja contra las ramas de un árbol y las ramas empujan de vuelta sobre el viento, se producen silbidos. Las fuerzas son interacciones entre diferentes cosas. Todo contacto necesita al menos dos partes; no hay forma en que un objeto pueda ejercer una fuerza sobre nada. Las fuerzas, ya sean grandes empellones o ligeros empujoncitos, siempre ocurren en pares, cada uno de los cuales es opuesto al otro. Por ende, no puedes tocar sin ser tocado.

**FIGURA 5.19**
El autor y su esposa Lil demuestran la tercera ley de Newton: no puedes tocar sin ser tocado.

### PUNTO DE CONTROL

1. **Un automóvil acelera sobre una carretera. Identifica la fuerza que mueve al automóvil.**
2. **Un autobús a gran rapidez y un inocente bicho tienen una colisión frontal. La fuerza del impacto aplasta al pobre bicho contra el parabrisas. ¿La fuerza correspondiente que el bicho ejerce contra el parabrisas es mayor, menor o igual? ¿La desaceleración resultante del autobús es mayor, menor o igual que la del bicho?**

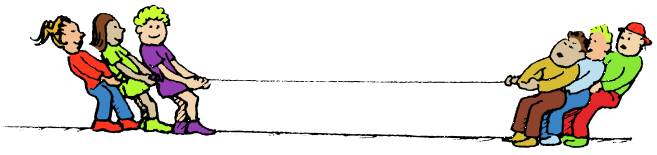
### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La carretera es la que empuja sobre el automóvil. ¡Es verdad! Sólo la carretera proporciona la fuerza horizontal que mueve al automóvil hacia adelante. ¿Cómo hace esto? Las llantas giratorias del automóvil empujan hacia atrás sobre la carretera (acción). El camino simultáneamente empuja hacia adelante sobre las llantas (reacción). ¡Qué tal!
2. Las magnitudes de ambas fuerzas son iguales porque componen un par de fuerzas acción-reacción que constituye la interacción entre el autobús y el bicho. Sin embargo, las aceleraciones son muy diferentes, porque las masas son distintas. El bicho experimenta una desaceleración enorme y mortal, en tanto que el autobús experimenta una desaceleración muy pequeña, tan pequeña que el muy leve frenado del autobús pasa desapercibido para sus pasajeros. Pero si el bicho fuese más masivo (tan masivo como otro autobús, por ejemplo), el frenado desafortunadamente sería muy notorio. (¿Puedes ver la maravilla de la física aquí? Aunque es muy *diferente* para el bicho y el autobús, la cantidad de fuerza que encuentra cada uno es la *misma*. ¡Sorprendente!)

**FIGURA 5.20**
Los ladrillos originalmente estaban rectos. ¿Ves la prueba de que los automóviles empujan hacia atrás sobre el camino cuando aceleran hacia adelante? ¿O que empujan hacia adelante sobre el camino cuando frenan?

## PRACTICANDO LA FÍSICA: GUERRA DE JALAR LA SOGA

Realiza una competencia de jalar la soga entre chicos y chicas. Realízala sobre un piso pulido que esté un poco resbaloso, y que los muchachos usen calcetines y las muchachas zapatos con suela de caucho. ¿Quién seguramente ganará y por qué? (*Sugerencia:* ¿quién gana una competencia de jalar la soga: quienes empujan más fuerte sobre la soga o quienes empujan más fuerte contra el suelo?)



## 5.4 Vectores y la tercera ley

Tal como un par de vectores en ángulo recto pueden combinarse en un vector resultante, cualquier vector puede descomponerse en dos vectores *componentes* perpendiculares entre sí. Estos dos vectores se conocen como los **componentes** de un vector dado, al que sustituyen (Figura 5.21). El proceso de determinar los componentes de un vector se denomina *descomposición*. Cualquier vector dibujado en una hoja de papel puede descomponerse en un componente vertical y uno horizontal.

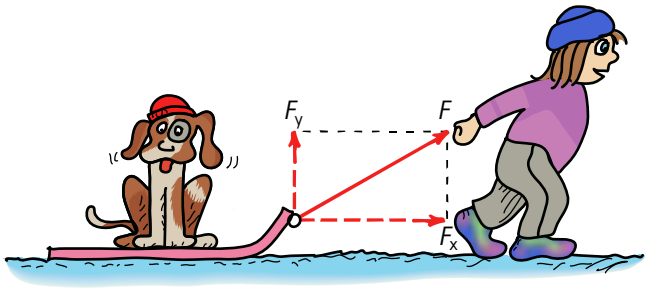



**FIGURA 5.21**
La fuerza $F$ que Nellie ejerce sobre el trineo tiene un componente horizontal $F_x$ y un componente vertical $F_y$. (No se muestran otras fuerzas sobre el trineo.)

La resolución de vectores se ilustra en la Figura 5.22. Un vector $\boldsymbol{V}$ se dibuja en la dirección adecuada para representar una cantidad vectorial. Luego se trazan líneas verticales y horizontales (*ejes*) en el origen del vector. A continuación se dibuja un rectángulo que tiene a $\boldsymbol{V}$ como su diagonal. Los lados de este rectángulo son los componentes deseados, $V_x$ y $V_y$. Observa que la suma vectorial de los vectores $V_x$ y $V_y$ es $\boldsymbol{V}$.

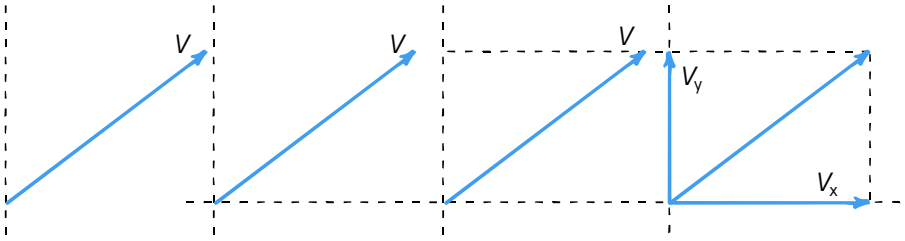
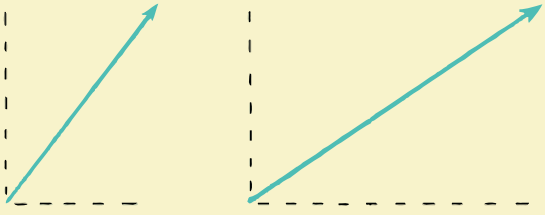



**FIGURA 5.22**
Construcción de los componentes vertical y horizontal de un vector.

**PUNTO DE CONTROL**

**Con una regla, dibuja los componentes vertical y horizontal de los dos vectores mostrados. Mide los componentes y compara tus hallazgos con las respuestas que se dan a continuación.**



**RESPUESTAS**

Vector izquierdo: el componente horizontal mide 2 cm; el componente vertical, 2.6 cm. Vector derecho: el componente horizontal mide 3.8 cm; el componente vertical, 2.6 cm.

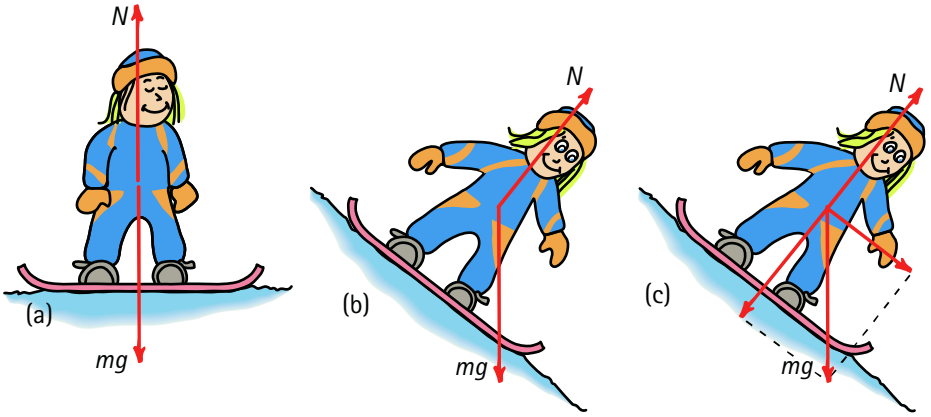



**FIGURA 5.23**
(a) Nellie Newton presiona contra la superficie, *mg* (acción), y la superficie presiona sobre Nellie, *N* (reacción). De modo que *mg* y *N* son iguales y opuestas. (b) Nellie presiona con menos fuerza contra la superficie inclinada, por lo que en el modo de acción-reacción, la fuerza normal *N* es correspondientemente más pequeña. (c) El componente de *mg* perpendicular a la superficie inclinada tiene la misma magnitud que *N*; el componente de *mg* paralelo a la superficie proporciona aceleración.

En capítulos anteriores se usaron vectores para ilustrar las fuerzas de peso y normal de objetos sobre superficies de sostén. Cuando una superficie es horizontal y sólo la gravedad actúa sobre un objeto, la fuerza normal ejercida por la superficie tiene la misma magnitud que *mg*, la fuerza debida a la gravedad. La esquiadora de *snowboarding*, Nellie Newton, ilustra esto en la Figura 5.23a. La tercera ley de Newton es evidente pues el peso *mg* de Nellie es la fuerza que ella ejerce contra la superficie, en tanto que la reacción es la superficie que ejerce una fuerza *N* igual y opuesta sobre Nellie.

Sin embargo, supón que Nellie está sobre una superficie inclinada, como una colina (Figura 5.23b). El vector *mg* es vertical y actúa hacia abajo, con un solo componente de *mg* que presiona contra la superficie. De modo que la fuerza normal *N* es menor. Si, por ejemplo, la superficie fuese vertical, no ocurriría presión y *N* sería cero.

Observa otra cosa. El componente de *mg* perpendicular a la superficie tiene la misma magnitud que *N* (Figura 5.23c). Observa también que la aceleración de Nellie hacia abajo de la colina se debe al componente de *mg* que es paralelo a la superficie de la colina. En el caso de colinas más inclinadas, este componente de *mg* y su aceleración serían mayores. Si la superficie fuese vertical, ¡la aceleración sería un *g* completo y Nellie estaría en caída libre! Un bloque de hielo sobre varios planos inclinados sin fricción ilustra esta disminución de *N* en pendientes más pronunciadas (Figura 5.24).

**VIDEO: Representación vectorial: cómo sumar y restar vectores**

**VIDEO: Suma geométrica de vectores**

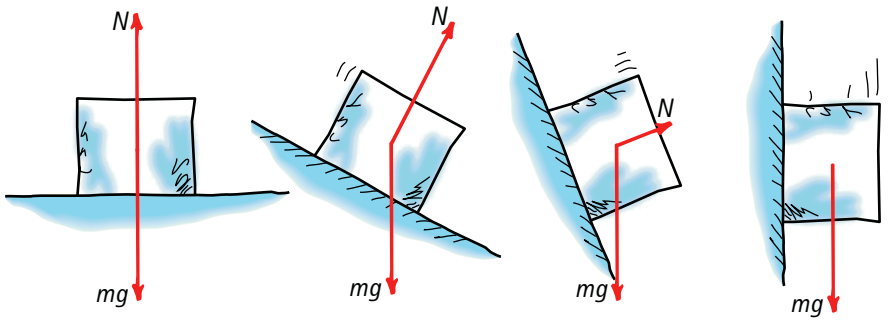



**FIGURA 5.24**
A medida que se vuelve más pronunciada la inclinación del plano, la fuerza normal *N* sobre un bloque de hielo disminuye, y *N* es cero cuando el plano inclinado es vertical.

En la Figura 5.25 se muestran tres tomas de un zapato sobre un plano inclinado, primero sobre una superficie sin fricción donde sólo dos fuerzas actúan sobre el zapato (Figura 5.25a). Cuando hay fricción, un vector adicional *f* representa la fuerza de fricción (Figura 5.25b). Es interesante saber si la cantidad de fricción es menor que o igual a la resultante de *N* y *mg* (Figura 5.25c). Si *f* es igual a la resultante el zapato estará en equilibrio, lo que puede significar que está en reposo, o que si se le da un empujoncito, se desliza por el plano con velocidad constante. Es probable que en la parte de laboratorio de tu curso experimentes con estas ideas.

En la Figura 5.26 se puede ver al mono Mo suspendido en reposo en un zoológico, sujetado de una soga con una mano y del lado de la jaula con la otra. La aplicación de la regla del paralelogramo muestra que la tensión *T* en la soga es mayor que *mg*.

**SCREENCAST: Vectores de fuerza sobre un plano inclinado**

**FIGURA 5.25**
(a) Sobre hielo sin fricción, sólo *mg* y *N* actúan sobre el zapato. (b) Sobre la tabla de madera, está presente una fuerza de fricción *f*. (c) En el equilibrio, la resultante de *N* y *mg* es igual y opuesta a *f*.

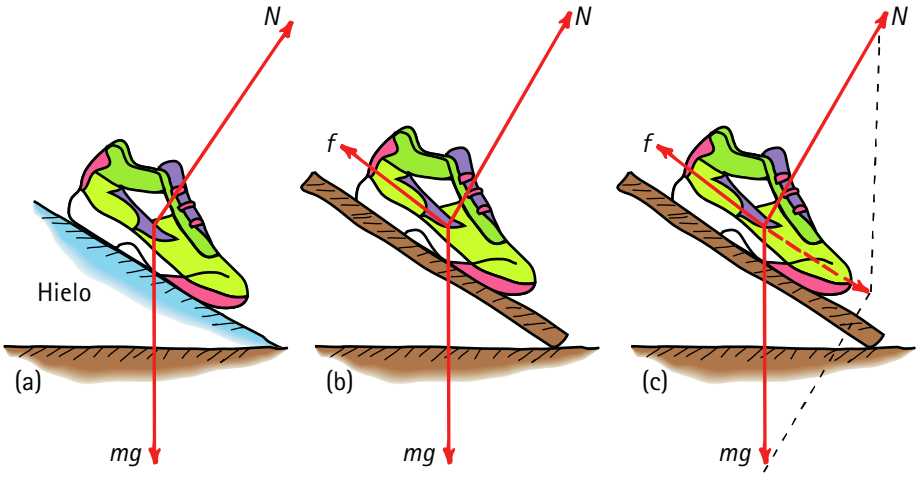
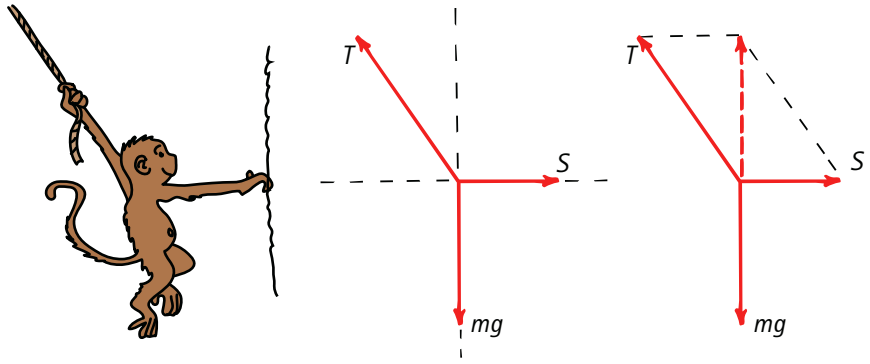



**FIGURE 5.26**
El mono Mo y las tres fuerzas que proporcionan equilibrio.

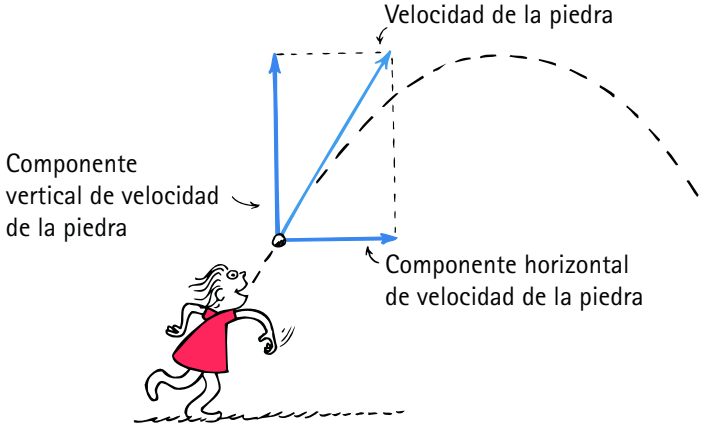



Observa que el jalón lateral *S* sobre la jaula es menor que *mg*. Aunque no se indica en la figura, ¿puedes ver que *S* es igual al componente horizontal de *T*? ¿Y que *mg* es igual al componente vertical de *T*? Analizar fuerzas en términos de vectores y sus componentes es muy ilustrativo.

La Figura 5.27 ilustra los componentes vectoriales de la velocidad. En ausencia de resistencia del aire, el componente horizontal de velocidad permanece constante, en concordancia con la primera ley de Newton. Por el contrario, el componente vertical está bajo la influencia de la gravedad y disminuye con el movimiento ascendente y gana lo que pierde en el movimiento descendente.

En el Capítulo 10 se analizan de nuevo los componentes vectoriales de la velocidad, cuando se aborda el movimiento de proyectiles.

**FIGURA 5.27**
Los componentes horizontal y vertical de la velocidad de una piedra lanzada.



## 5.5 Resumen de las tres leyes de Newton

Primera ley de Newton, la ley de la inercia: un objeto en reposo tiende a permanecer en reposo; un objeto en movimiento tiende a permanecer en movimiento con rapidez constante a lo largo de una trayectoria en línea recta. Esta propiedad de los objetos a resistir el cambio de movimiento se llama *inercia*. La masa es una medida de inercia. Los objetos experimentarán cambios de movimiento sólo en presencia de una fuerza neta.

Segunda ley de Newton, la ley de aceleración: cuando una fuerza neta actúa sobre un objeto, el objeto acelerará. La aceleración es directamente proporcional a la fuerza neta e inversamente proporcional a la masa. De manera simbólica, $a = F/m$. La aceleración siempre es en la dirección de la fuerza neta. Cuando los objetos caen en el vacío, la fuerza neta es simplemente el jalón de la gravedad, y la aceleración es $g$ (el símbolo $g$ denota que la aceleración se debe a la gravedad sola). Cuando los objetos caen en el aire, la fuerza neta es igual al jalón de la gravedad menos la fuerza de la resistencia del aire, y la aceleración es menor que $g$. Si la fuerza de la resistencia del aire es igual a la fuerza gravitacional sobre un objeto que cae, la aceleración termina y el objeto cae con rapidez constante (llamada *rapidez terminal*).

Tercera ley de Newton, la ley de acción-reacción: siempre que un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, el segundo objeto ejerce una fuerza igual y opuesta sobre el primero. Las fuerzas ocurren en pares, una acción y la otra reacción, que en conjunto constituyen la interacción entre un objeto y el otro. Acción y reacción siempre ocurren de manera simultánea y actúan sobre diferentes objetos. Ninguna fuerza existe sin la otra.

Las tres leyes de Isaac Newton de movimiento son reglas de la naturaleza que permiten ver la manera tan hermosa como tantas cosas se conectan con otras. En el entorno cotidiano se observan estas reglas en acción.

**FIGURA 5.28**
Los gansos vuelan en una formación en V porque el aire que empujan hacia abajo en la punta de sus alas gira hacia arriba, lo que crea una corriente ascendente que es más fuerte hacia el lado del ave. Un ave rezagada consigue sustentación adicional si se coloca en esta corriente ascendente, empuja aire hacia abajo y crea otra corriente ascendente para la siguiente ave, etc. El resultado es una parvada que vuela en una formación en V.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Tercera ley de Newton.** Siempre que un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, el segundo objeto ejerce una fuerza igual y opuesta sobre el primero.

**Componentes.** Vectores perpendiculares entre sí, por lo general horizontal y vertical, cuya suma vectorial es un vector dado.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 5.1 Fuerzas e interacciones

1. Cuando empujas contra una pared con los dedos, éstos se doblan porque experimentan una fuerza. Identifica esta fuerza.
2. Un boxeador puede golpear un pesado saco con gran fuerza. ¿Por qué no puede golpear un papel de seda en el aire con la misma cantidad de fuerza?
3. ¿Cuántas fuerzas se necesitan para una interacción?

### 5.2 Tercera ley de Newton de movimiento

4. Enuncia la tercera ley de Newton de movimiento.
5. Piensa que golpeas una pelota de béisbol con un bate. Si a la fuerza del bate contra la bola la llamas fuerza de *acción*, identifica la fuerza de *reacción*.
6. Si el sistema de la Figura 5.9 sólo es la naranja, ¿existe una fuerza neta sobre el sistema cuando la manzana jala?
7. Si se considera que el sistema es la manzana y la naranja en conjunto (Figura 5.10), ¿existe una fuerza neta sobre el sistema cuando la manzana jala (ignora la fricción con el suelo)?
8. Para producir una fuerza neta sobre un sistema, ¿debe haber una fuerza neta aplicada externamente?
9. Considera al sistema de un solo balón de fútbol. Si lo pateas, ¿existe una fuerza neta que acelere el sistema? Si un amigo lo patea al mismo tiempo con una fuerza igual y opuesta, ¿existe una fuerza neta que acelere el sistema?

### 5.3 Acción y reacción sobre masas diferentes

10. La Tierra jala hacia abajo sobre ti con una fuerza gravitacional que llamas tu peso. ¿Tú jalas hacia arriba a la Tierra con la misma cantidad de fuerza?

11. Si las fuerzas que actúan sobre una bala de cañón y sobre el cañón que recula, desde el cual se dispara, son iguales en magnitud, ¿por qué la bala de cañón y el cañón tienen aceleraciones muy diferentes?
12. Identifica la fuerza que impulsa un cohete.
13. ¿Cómo es que un helicóptero obtiene su fuerza de sustentación?
14. ¿Puedes tocar físicamente a una persona sin que la persona te toque con la misma cantidad de fuerza?

### 5.4 Vectores y la tercera ley

15. ¿Qué se entiende con el término *descomposición de vectores*?
16. ¿Qué ocurre con la magnitud del vector normal arriba de un bloque en reposo sobre un plano inclinado cuando aumenta el ángulo de inclinación?
17. ¿Cuán grande es la fuerza de fricción que actúa sobre un zapato en reposo sobre un plano inclinado, comparada con la resultante de los vectores *mg* y *N*?
18. ¿Cómo cambia la magnitud del componente vertical de velocidad para una bola lanzada en un ángulo hacia arriba a medida que la bola viaja en dicha dirección? ¿Y el componente horizontal de velocidad cuando la resistencia del aire es despreciable?

### 5.5 Resumen de las tres leyes de Newton

19. Llena los espacios: la primera ley de Newton con frecuencia se llama ley de _____; la segunda ley de Newton es la ley de _____, y la tercera ley de Newton es la ley de _____ y _____.
20. ¿Cuál de las tres leyes de Newton se centra en las *interacciones*?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

21. Sostén tu mano como un ala plana afuera de la ventana de un automóvil en movimiento. Luego inclina ligeramente hacia arriba el borde frontal y observa el efecto de sustentación. ¿Puedes ver cómo funcionan aquí las leyes de Newton?
22. Intenta empujar tus dedos unos contra otros. ¿Puedes empujar más fuerte sobre un dedo que sobre el otro?

## SUSTITUYE Y LISTO (FAMILIARIZACIÓN CON ECUACIONES)

23. Calcula la resultante del par de velocidades de 100 km/h norte y 75 km/h sur. Calcula la resultante si ambas velocidades se dirigen hacia el norte.

    **Resultante de dos vectores en ángulos rectos entre sí:**

    $$R = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

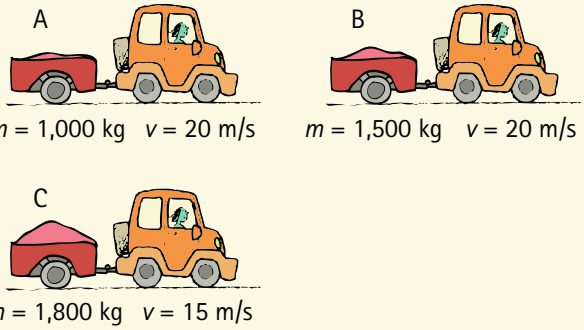
24. Calcula la magnitud de la resultante de un par de vectores de velocidad de 100 km/h que están en ángulos rectos entre sí.
25. Calcula la resultante de un vector horizontal con una magnitud de 4 unidades y un vector vertical con una magnitud de 3 unidades.
26. ¿Cuál será la rapidez de un avión que normalmente vuela a 200 km/h, cuando encuentra un viento de lado de 80 km/h (en ángulo recto con el avión)?

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

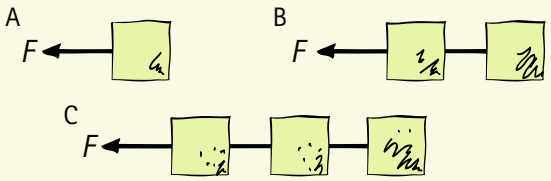
27. Un boxeador golpea una hoja de papel a mitad del aire y la lleva desde el reposo hasta una rapidez de 25 m/s en 0.05 s. (a) ¿Qué aceleración se imparte al papel? (b) Si la masa del papel es 0.003 kg, ¿qué fuerza ejerce el boxeador sobre él? (c) ¿Cuánta fuerza ejerce el papel sobre el boxeador?
28. Si estás de pie junto a una pared sobre una patineta sin fricción y empujas la pared con una fuerza de 40 N, ¿cuán fuerte empuja la pared sobre ti? Si tu masa es de 80 kg, demuestra que tu aceleración es 0.5 $m/s^2$.
29. Fuerzas de 3 N y 4 N actúan en ángulos rectos sobre un bloque de 2 kg de masa. Demuestra que la aceleración del bloque es 2.5 $m/s^2$.
30. Cuando dos discos de aire idénticos, con imanes repelentes, se mantienen juntos en una mesa de aire y luego se sueltan, terminan moviéndose en direcciones opuestas con la misma rapidez, *v*. Supón que la masa de uno de los discos se duplica y que el procedimiento se repite.
    a. De acuerdo con la tercera ley de Newton, demuestra que la rapidez final del disco con el doble de masa es la mitad que la del disco sencillo.
    b. Calcula la rapidez del disco con masa doble si el disco sencillo se aleja a 0.4 m/s.

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

31. Una camioneta ejerce una fuerza sobre remolques de diferentes masas *m*. Comparadas con la fuerza ejercida sobre cada remolque, clasifica las magnitudes de las fuerzas que cada remolque ejerce sobre la camioneta. (¿O todas son pares de fuerzas con igual magnitud?)

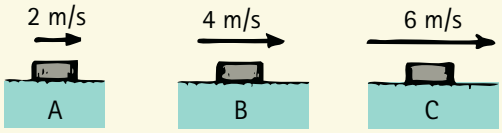



32. Cada una de estas cajas es jalada por la misma fuerza *F* hacia la izquierda. Todas las cajas tienen la misma masa y se deslizan sobre una superficie sin fricción. Clasifica lo siguiente de mayor a menor:
    a. La aceleración de las cajas.



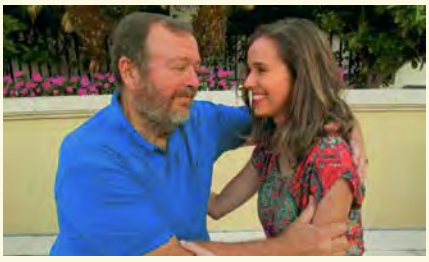

    b. Las tensiones de las sogas conectadas a las cajas individuales a la derecha en B y en C.

33. Tres discos idénticos, A, B y C, se deslizan por el hielo con las rapideces dadas. Las fuerzas del aire y de la fricción del hielo son despreciables.
    a. Clasifica los discos por la fuerza necesaria para mantenerlos en movimiento, de mayor a menor.
    b. Clasifica los discos por la fuerza necesaria para detenerlos en el mismo intervalo, de mayor a menor.




## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

34. En cada una de las siguientes interacciones, identifica las fuerzas de acción y reacción: (a) Un martillo golpea un clavo. (b) La gravedad de la Tierra jala hacia abajo sobre un libro. (c) Las aspas de un helicóptero empujan el aire hacia abajo.
35. La fotografía muestra a Steve Hewitt con su hija Gretchen. ¿Gretchen toca a su padre, o su padre la toca a ella? Explica.

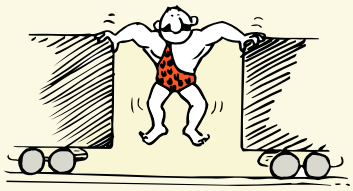


36. Cuando te frotas las manos, ¿puedes empujar más fuerte sobre una mano que sobre la otra?
37. Sostienes una manzana sobre tu cabeza. (a) Identifica todas las fuerzas que actúan sobre la manzana y sus fuerzas de reacción. (b) Cuando sueltas la manzana, identifica todas las fuerzas que actúan sobre ella cuando cae y las correspondientes fuerzas de reacción. Desprecia el arrastre aerodinámico.
38. Identifica los pares de fuerzas acción-reacción en las siguientes situaciones: (a) Bajas de una acera. (b) Das una palmada en la espalda a tu tutor. (c) Una ola golpea una costa rocosa.
39. Piensa en un jugador de béisbol que batea una pelota. Identifica los pares acción-reacción (a) cuando se golpea la pelota y (b) mientras la pelota está en vuelo.
40. ¿Cuál es la física involucrada en el caso de un pasajero que se siente presionado hacia atrás contra el asiento de un avión cuando éste acelera en la pista durante el despegue?
41. Si sueltas una bola de caucho sobre el suelo, rebota de vuelta hacia arriba. ¿Qué fuerza actúa sobre la bola para proporcionar el rebote?
42. En el interior de un libro que está sobre una mesa hay miles de millones de fuerzas que empujan y jalan sobre todas las moléculas. ¿Por qué dichas fuerzas nunca por casualidad suman una fuerza neta en una dirección, lo que haría que el libro acelerara "espontáneamente" a través de la mesa?
43. Si ejerces una fuerza horizontal de 200 N para deslizar con velocidad constante una caja por el suelo de una fábrica, ¿cuánta fricción ejerce el suelo sobre la caja? ¿La fuerza de fricción es igual y con dirección opuesta a tu empuje de 200 N? Si la fuerza de fricción no es la fuerza de reacción a tu empuje, ¿qué es?
44. Cuando el deportista sostiene la barra de pesas sobre su cabeza, la fuerza de reacción es el peso de la barra de pesas sobre su mano. ¿Cómo varía esta fuerza en el caso en el que la barra de pesas se acelera hacia arriba? ¿Hacia abajo?

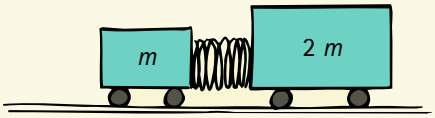
45. Considera las dos fuerzas que actúan sobre una persona que está de pie quieta, a saber, el jalón descendente de la gravedad y el soporte ascendente del suelo. ¿Estas fuerzas son iguales y opuestas? ¿Forman un par acción-reacción? ¿Por qué sí o por qué no?

46. ¿Por qué puedes ejercer mayor fuerza sobre los pedales de una bicicleta si te enderezas en el manubrio?

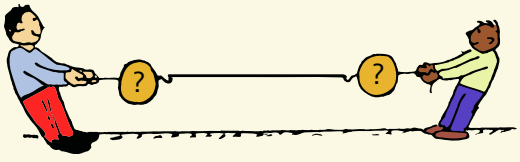
47. ¿Por qué un escalador tira hacia abajo sobre la soga para moverse hacia arriba?
48. Empujas un pesado automóvil con las manos. El automóvil, a su vez, te empuja de vuelta con una fuerza igual y opuesta. ¿Esto no significa que las fuerzas se cancelan mutuamente, lo que hace imposible la aceleración? ¿Por qué sí o por qué no?
49. El hombre fuerte empujará para separar los dos vagones de carga de igual masa, inicialmente estacionarios, antes de caer recto hacia el suelo. ¿Es posible que él dé a alguno de los vagones una mayor rapidez que al otro? ¿Por qué sí o por qué no?



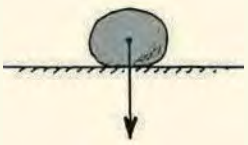
50. Supón que dos carros, uno con el doble de masa que el otro, se separan cuando se suelta el resorte comprimido que los une. ¿Cuál es la aceleración del carro más pesado en relación con la del carro más ligero a medida que se separan?



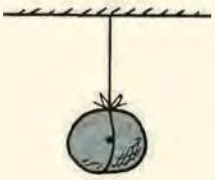

51. Si un camión y un automóvil compacto tienen una colisión frontal, ¿sobre cuál vehículo es mayor la fuerza de impacto? ¿Cuál vehículo experimenta mayor desaceleración? Explica tus respuestas.
52. Ken y Joanne son astronautas que flotan separados cierta distancia en el espacio. Están unidos mediante una cuerda de seguridad cuyos extremos están amarrados alrededor de sus cinturas. Si Ken comienza a jalar sobre la cuerda, ¿jalará a Joanne hacia él, o él se jalará hacia Joanne, o ambos astronautas se moverán? Explica.
53. ¿Cuál equipo gana en una competencia de jalar la soga: el equipo que jala más duro sobre la soga o el equipo que empuja más duro contra el suelo? Explica.
54. En una competencia de jalar la soga entre Sam y Maddy, cada uno jala sobre la soga con una fuerza de 250 N. ¿Cuál es la tensión en la soga? Si ambos permanecen inmóviles, ¿qué fuerza horizontal ejerce cada uno contra el suelo?
55. Tu instructor lanza el reto de que tú y tu amigo jalen cada uno sobre un par de básculas unidas a los extremos de una soga horizontal, en forma parecida a una competencia de jalar la soga, de modo que las lecturas en las básculas diferirán. ¿Puede hacerse esto? Explica.




56. Dos personas de igual masa intentan jugar a jalar una soga de 12 m mientras están paradas sobre hielo sin fricción. Cuando jalan sobre la soga, cada una de ellas se desliza hacia la otra. ¿Cómo se comparan sus aceleraciones y cuánto se desliza cada persona antes de encontrarse?
57. ¿Qué aspecto de la física no sabía el escritor de esta editorial de periódico que ridiculizaba los primeros experimentos de Robert H. Goddard acerca de la propulsión de cohetes sobre la atmósfera de la Tierra?: "El profesor Goddard... no conoce la relación entre acción y reacción, ni la necesidad de tener algo mejor que un vacío contra el cual reaccionar... parece carecer del conocimiento que se imparte diariamente en los bachilleratos".
58. ¿Por qué la lluvia que cae verticalmente forma bandas diagonales sobre las ventanas laterales de un automóvil en movimiento? Si las bandas forman un ángulo de 45°, ¿qué te dice esto acerca de las rapideces relativas del automóvil y la lluvia que cae?
59. Un globo aerostático flota sin movimiento en el aire. Un aeronauta comienza a ascender por el cable de sostén. ¿En cuál dirección se mueve el globo conforme asciende el aeronauta? Defiende tu respuesta.
60. Hay dos interacciones en una piedra que está en reposo sobre el suelo. Una es entre la piedra y la Tierra como totalidad: la Tierra jala hacia abajo sobre la piedra ($mg$) y la piedra jala hacia arriba sobre la Tierra. ¿Cuál es la otra interacción?
61. Una piedra se muestra en reposo sobre el suelo. (a) El vector muestra el peso de la piedra. Para completar el diagrama vectorial muestra otro vector que resulte en fuerza neta cero sobre la piedra. (b) ¿Cuál es el nombre convencional del vector que dibujaste?



62. Una piedra está suspendida en reposo mediante una cuerda. (a) Dibuja vectores de fuerza para todas las fuerzas que actúen sobre la piedra. (b) ¿Tus vectores deben tener un resultante cero? (c) ¿Por qué sí o por qué no?



63. La misma piedra se acelera verticalmente hacia arriba. (a) Dibuja vectores de fuerza con alguna escala adecuada que muestren las fuerzas relativas que actúan sobre la piedra. (b) ¿Cuál es el vector más largo y por qué?

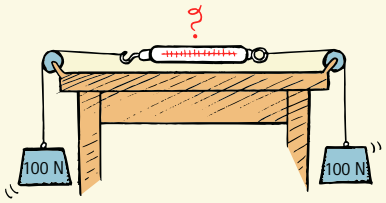
64. Supón que la cuerda del ejercicio anterior se rompe y la piedra detiene su movimiento hacia arriba. Dibuja un diagrama de vectores de fuerza de la piedra cuando llega a la parte superior de su trayectoria.
65. ¿Cuál es la aceleración de la piedra del ejercicio anterior en la parte superior de su trayectoria?
66. Aquí la piedra se desliza hacia abajo sobre un plano inclinado sin fricción. (a) Identifica las fuerzas que actúan sobre ella y dibuja vectores de fuerza adecuados. (b) Usa la regla del paralelogramo para construir la fuerza resultante sobre la piedra (que muestre cuidadosamente que tiene una dirección paralela al plano inclinado, la misma dirección que la aceleración de la piedra).

67. La piedra está en reposo e interactúa tanto con la superficie del plano inclinado como con el bloque. (a) Identifica todas las fuerzas que actúan sobre la piedra y dibuja vectores de fuerza adecuados. (b) Demuestra que la fuerza neta sobre la piedra es cero. (*Sugerencia 1:* existen dos fuerzas normales sobre la piedra. *Sugerencia 2:* asegúrate de que los vectores que dibujes sean para fuerzas que actúan *sobre* la piedra, no *por* la piedra sobre las superficies.)

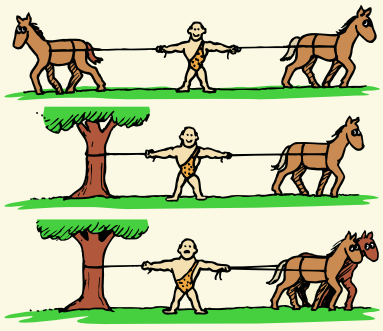
68. En la Figura 5.25, ¿cómo se relaciona la magnitud de $f$ con la suma vectorial de $mg$ y $N$ cuando el zapato está en equilibrio? ¿Qué ocurre si $f$ es menor que esta suma?
69. Observa al mono Mo de la Figura 5.26. Si la soga forma un ángulo de 45° con la vertical, ¿cuál será la diferencia de las magnitudes de los vectores $S$ y $mg$?
70. Observa al mono Mo de la Figura 5.26. ¿Cuál será la magnitud del vector $S$ si la soga que sostiene a Mo es vertical? Si la soga fuese horizontal, ¿cómo sería diferente el vector $S$? ¿Por qué los vectores $T$ y $S$ no pueden ser ambos horizontales?
71. Una niña lanza una bola hacia arriba en la Figura 5.27. Si el arrastre aerodinámico es despreciable, ¿cómo se relaciona el componente horizontal de velocidad con la primera ley de Newton de movimiento?
72. Conforme una bola lanzada viaja por el aire, una fuerza de gravedad $mg$ actúa sobre ella. Identifica la reacción a esta fuerza. Identifica también la aceleración de la bola a lo largo de su trayectoria, incluso en la parte superior de su trayectoria.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

73. Un cohete se vuelve progresivamente más fácil de acelerar conforme viaja a través del espacio. Discute por qué sucede esto. (*Sugerencia:* cerca de 90% de la masa de un cohete recién lanzado es combustible.)
74. Cuando pateas un balón de fútbol, ¿qué fuerzas de acción y reacción están involucradas? ¿Cuál fuerza, si la hay, es mayor?
75. ¿Es cierto que, cuando caes de una rama hacia el suelo, jalas hacia arriba sobre la Tierra? Si es así, ¿entonces por qué la aceleración de la Tierra no se aprecia?
76. Dos pesos de 100 N están unidos a un dinamómetro como se muestra. ¿El dinamómetro lee 0, 100 o 200 N, o proporciona alguna otra lectura? (*Sugerencia:* ¿la lectura sería diferente si una de las sogas estuviera atada a la pared en lugar de estarlo al peso colgante de 100 N?)




77. ¿Un bate de béisbol frena cuando golpea una pelota? Discute y defiende tu respuesta.
78. Un bate de béisbol se abanica contra una pelota de béisbol, la cual acelera. Cuando la bola es atrapada, ¿qué produce la fuerza sobre el guante del jugador?
79. Un campesino urge a su caballo para que jale un vagón. El caballo se rehúsa y dice que tratarlo sería inútil, pues desobedecería la tercera ley de Newton. El caballo concluye que no puede ejercer una fuerza mayor sobre el vagón que la que el vagón ejerce sobre él y, por tanto, que no podrá acelerar el vagón. Discute tu razonamiento para convencer al caballo de que jale.
80. El hombre fuerte puede soportar la fuerza de tensión ejercida por los dos caballos que jalan en direcciones opuestas. ¿Cómo se compararía la tensión si sólo un caballo jalara y la soga izquierda estuviera amarrada a un árbol? ¿Cómo se compararía la tensión si los dos caballos jalaran en la misma dirección, con la soga izquierda amarrada al árbol?



6

CAPÍTULO 6

# Cantidad de movimiento


6.1 Cantidad de movimiento

6.2 Impulso

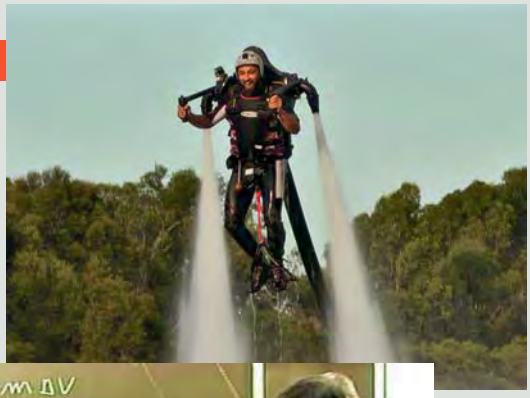
6.3 El impulso cambia la cantidad de movimiento

6.4 Rebote

6.5 Conservación de la cantidad de movimiento

6.6 Colisiones

6.7 Colisiones más complicadas

1 El impulso descendente de los chorros de agua produce una cantidad de movimiento ascendente que permite a Derek Muller flotar en el aire. 2 Howie Brand demuestra los diferentes resultados cuando un dardo rebota en un bloque de madera en lugar de quedar pegado a él. Un dardo que rebota produce más impulso, lo que inclina el bloque. 3 Lo mismo sucede con la rueda Pelton, donde el agua que rebota de los álabes curvos produce más impulso, lo que imparte más cantidad de movimiento a la rueda. 4 La cantidad de movimiento es masa por rapidez, como muestra Alex Hewitt con su patineta.

Derek Muller descubrió el camino que lo llevó a la enseñanza de la física gracias a sus tres pasiones: comprender el mundo, ayudar a otros y hacer películas. En su niñez, estaba obsesionado con las aplicaciones prácticas de los fenómenos naturales. En lugar de jugar con juguetes, plantaba jardines con plantas comestibles, cultivaba gusanos de seda por sus preciados capullos y aprendió a fabricar vajillas de cerámica que usaba cuando comía sus cultivos. Estaba intrigado con la ciencia, que le parecía mágica.

La temprana inspiración de Derek por la enseñanza provino de sus dos hermanas mayores, quienes le enseñaron habilidades y el aprecio por la enseñanza esmerada. Más adelante, en la secundaria y el bachillerato, tomó el papel de profesor y transmitió su conocimiento científico a amigos y compañeros. Al brindar asesorías, experimentó la satisfacción de enseñar bien un concepto y valoró el sentimiento de ser útil. Su ruta lo condujo, entonces, a la educación en física.

Después de obtener su grado en Ingeniería Física en Queens University en Kingston, Canadá, Derek se mudó a Australia, donde obtuvo su doctorado en investigación para la enseñanza de la física en la Universidad de Sidney. Como parte de su investigación doctoral, estudió la efectividad de los videos científicos en línea. Para su sorpresa, descubrió que la mayoría de los estudiantes novatos no aprendía nada de física con las lecciones de física en video (en descargo de responsabilidad, mis videos de física conceptual no fueron parte de su estudio). Derek identificó lo que consideró la raíz del problema: las interpretaciones erróneas que hacían los estudiantes de la física elemental. Descubrió que el problema no tenía que ver con la física. Luchar contra las malas interpretaciones científicas del público general se convirtió en la labor de Derek.

Para superar las malas interpretaciones frecuentes y allanar el camino hacia el aprendizaje, Derek creó un canal en YouTube llamado *Veritasium*. En este canal publica videos científicos, en particular de física, en los que involucra al público general en discusiones animadas. En los videos, Derek hace notar contradicciones que impiden despertar el asombro que provoca la comprensión. Con este enfoque, Derek creó más de 130 videos, que se han visto más de 17 millones de veces. A nivel mundial, el canal de Derek está clasificado en los mejores 1,000, con más de 300,000 suscriptores (al momento de que este libro está en prensa).

En este momento de transición en los métodos de enseñanza, la comunidad física tiene un gran pionero en Derek Muller, quien verdaderamente descubrió una forma efectiva para que el público en todo el mundo valore y comprenda la física.

## 6.1 Cantidad de movimiento

Todo mundo sabe que es más difícil detener un camión pesado que un automóvil pequeño que se mueve con la misma rapidez. Para describir este hecho se dice que el camión tiene más *cantidad de movimiento* que el automóvil. Y si dos automóviles tienen la misma masa, el más rápido es más difícil de detener que el más lento. De modo que también se dice que el automóvil que se mueve más rápido tiene más cantidad de movimiento que el automóvil más lento. Por **cantidad de movimiento** se entiende inercia en movimiento. De manera más específica, la cantidad de movimiento se define como el producto de la masa de un objeto y su velocidad:

$$\text{Cantidad de movimiento} = \text{masa} \times \text{velocidad}$$

O, en notación abreviada,

$$\text{Cantidad de movimiento} = mv$$

Cuando la dirección no es un factor importante, es posible decir

$$\text{Cantidad de movimiento} = \text{masa} \times \text{rapidez}$$

que se sigue abreviando *mv*.

En la definición se puede ver que un objeto en movimiento puede tener una gran cantidad de movimiento si su masa o su velocidad es grande, o si tanto su masa como su velocidad son grandes. El camión tiene más cantidad de movimiento que el automóvil que se mueve con la misma rapidez porque el camión tiene mayor masa. Puedes ver que un gran barco que se mueve con una rapidez pequeña puede tener una gran cantidad de movimiento, como la puede tener una pequeña bala que se mueve con gran rapidez.

**FIGURA 6.1**
La roca, por desgracia, tiene más cantidad de movimiento que el corredor.

**FIGURA 6.2**
¿Por qué los motores de un gran contenedor suelen apagarse a 25 km del puerto? Es muy importante saber encontrar el momento oportuno cuando se cambia la cantidad de movimiento.

**VIDEO: Definición de cantidad de movimiento**

Y, desde luego, un objeto enorme que se mueve con una gran rapidez, como un camión masivo que rueda colina abajo sin frenos, tiene una cantidad de movimiento enorme, en tanto que el mismo camión en reposo no tiene cantidad de movimiento en absoluto porque el término $v$ en $mv$ es cero.

## 6.2 Impulso

Si la cantidad de movimiento de un objeto cambia, entonces la masa o la velocidad o ambas cambian. Si la masa permanece invariable, como suele suceder, entonces la velocidad cambia y ocurre una aceleración. ¿Qué produce esa aceleración? Sabes que la respuesta es la *fuerza.* Cuanto mayor sea la fuerza neta que actúa sobre un objeto, mayor es el cambio de velocidad en un intervalo de tiempo dado y, en consecuencia, mayor es su cambio en cantidad de movimiento.

Pero hay algo más que es importante para cambiar la cantidad de movimiento: el tiempo, es decir, durante cuánto tiempo actúa la fuerza. Si aplicas una fuerza breve a un automóvil que está parado, produces un cambio en su cantidad de movimiento. Aplica la misma fuerza durante un periodo más prolongado y produces un cambio más grande en la cantidad de movimiento del automóvil. Una fuerza sostenida durante un tiempo largo produce más cambio en la cantidad de movimiento que la misma fuerza aplicada un lapso breve. De modo que tanto la fuerza como el intervalo de tiempo son importantes para cambiar la cantidad de movimiento.

La cantidad *fuerza* × *intervalo de tiempo* se denomina **impulso**. En notación abreviada,

$$\text{Impulso} = Ft$$

**FIGURA 6.3**
Cuando empujas con la misma fuerza durante el doble de tiempo, impartes el doble de impulso y produces el doble de cambio en la cantidad de movimiento.

El tiempo es especialmente importante cuando cambias tu cantidad de movimiento.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Cuál tiene más cantidad de movimiento: 1 automóvil de 1 ton que se mueve a 100 km/h o un camión de 2 ton que se mueve a 50 km/h?**
2. **¿Un objeto en movimiento tiene impulso?**
3. **¿Un objeto en movimiento tiene cantidad de movimiento?**
4. **Para la misma fuerza, ¿cuál cañón imparte mayor impulso a una bala de cañón: un cañón largo o uno corto?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Ambos tienen la misma cantidad de movimiento (1 ton × 100 km/h = 2 ton × 50 km/h).
2. No, el impulso no es algo que un objeto *tenga,* como la cantidad de movimiento. El impulso es lo que un objeto puede *proporcionar* o que puede *experimentar* cuando interactúa con algún otro objeto. Un objeto no puede poseer impulso tal como no puede poseer fuerza.
3. Sí, pero, al igual que con la velocidad, en un sentido relativo; esto es, con respecto a un marco de referencia, que por lo general es la superficie de la Tierra. La cantidad de movimiento que posee un objeto en movimiento con respecto a un punto estacionario sobre la Tierra puede ser muy diferente de la cantidad de movimiento que tiene con respecto a otro objeto en movimiento.
4. El cañón largo imparte mayor impulso porque la fuerza actúa durante un tiempo más largo. (Un mayor impulso produce un mayor cambio en la cantidad de movimiento, de modo que un cañón largo imparte más rapidez a una bala que un cañón corto.)

## 6.3 El impulso cambia la cantidad de movimiento

Cuanto mayor sea el impulso ejercido sobre algo, mayor será el cambio en su cantidad de movimiento. La relación exacta es:

Impulso = cambio en cantidad de movimiento

Con frecuencia se usa el símbolo *p* para representar la cantidad de movimiento.

Todos los términos en esta relación pueden expresarse en notación abreviada con el símbolo delta Δ (una letra griega que se usa con frecuencia para denotar "cambio en" o "diferencia en"):[1]

$$Ft = \Delta(mv)$$

La **relación impulso-cantidad de movimiento** ayuda a analizar muchos ejemplos en los que actúan fuerzas y cambia el movimiento. En ocasiones el impulso puede considerarse como la causa de un cambio en la cantidad de movimiento. A veces un cambio en la cantidad de movimiento puede considerarse como la causa de un impulso. No importa en qué forma lo pienses. Lo importante es que impulso y cambio en la cantidad de movimiento siempre están vinculados. Aquí se presentarán algunos ejemplos comunes en los que el impulso se relaciona con 1) aumento de la cantidad de movimiento, 2) disminución de la cantidad de movimiento durante un tiempo prolongado y 3) disminución de la cantidad de movimiento durante un tiempo breve.

### Caso 1: aumento de la cantidad de movimiento

Para aumentar la cantidad de movimiento de un objeto, tiene sentido aplicar la fuerza más grande posible durante el mayor tiempo posible. Para que un golfista dé su golpe de salida y un beisbolista trate de conectar un cuadrangular, abanican lo más fuerte posible y continúan con su balanceo. Continuar con el balanceo extiende el tiempo de contacto.

Las fuerzas que intervienen en los impulsos por lo general varían de un instante a otro. Por ejemplo, un palo de golf que golpea una pelota ejerce fuerza cero sobre la bola hasta que ocurre el contacto; luego la fuerza aumenta rápidamente a medida que la bola se distorsiona (Figura 6.4). Luego la fuerza disminuye a medida que la bola adquiere rapidez y regresa a su forma original. De modo que, cuando se hable de tales fuerzas en este capítulo, se entenderá la fuerza *promedio*.

**FIGURA 6.4**
La fuerza de impacto sobre una pelota de golf varía a lo largo de la duración del impacto.

[1]Para derivar esta relación, se reordena la segunda ley de Newton de modo que el factor tiempo sea más evidente. Si la fórmula para aceleración, $a = F/m$, se iguala con lo que se define como la aceleración, $a = \Delta v/\Delta t$, se obtiene $F/m = \Delta v/\Delta t$. A partir de esto, se deriva $F\Delta t = \Delta(mv)$. Si a $\Delta t$ se le denomina simplemente $t$, el intervalo de tiempo, entonces $Ft = \Delta(mv)$.

**SCREENCAST: Cantidad de movimiento**

**VIDEO: Cambio en cantidad de movimiento-seguimiento**

## Caso 2: disminución de la cantidad de movimiento durante un tiempo prolongado

Si estuvieras en un automóvil que está fuera de control y tuvieras que elegir entre golpear una pared de concreto o una pila de paja, no tendrías que apelar a tu conocimiento de física para llegar a una decisión. El sentido común te dicta elegir la pila de paja. Pero conocer la física te ayuda a comprender *por qué* golpear un objeto suave es completamente diferente a golpear uno duro. En el caso de golpear o la pared o la paja y llegar a detenerse, el *mismo* impulso reduce tu cantidad de movimiento a cero. El mismo impulso no significa la misma cantidad de fuerza o la misma cantidad de tiempo; más bien significa el mismo *producto* de fuerza y tiempo. Al golpear la pila de paja en lugar de la pared, extiendes el *tiempo durante el cual tu cantidad de movimiento se reduce a cero.* Un intervalo de tiempo más largo reduce la fuerza y disminuye la desaceleración resultante. Por ejemplo, si el intervalo de tiempo se extiende 100 veces, la fuerza se reduce a una milésima. Siempre que quieras que la fuerza sea pequeña, extiende el tiempo de contacto, de ahí que los tableros acolchados y las bolsas de aire salven vidas en los vehículos motorizados.

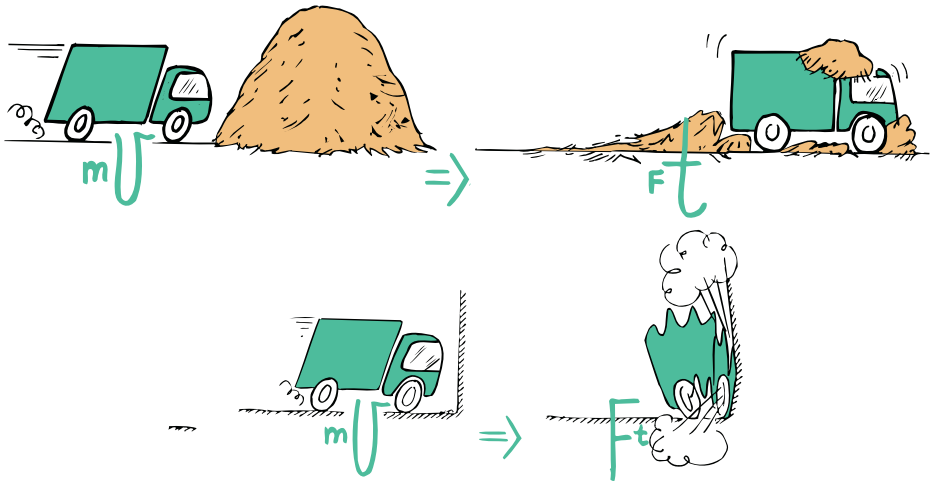



**FIGURA 6.5**
Si el cambio en cantidad de movimiento ocurre durante un tiempo prolongado, la fuerza del golpe es pequeña.

**FIGURA 6.6**
Si el cambio en cantidad de movimiento ocurre durante un tiempo breve, la fuerza del golpe es grande.

Cuando saltas desde una posición elevada hacia el suelo, ¿qué sucede si mantienes tus piernas rectas y rígidas? ¡Ay! En vez de ello, doblas tus rodillas cuando tus pies hacen contacto con el suelo. Al hacerlo, extiendes el tiempo durante el cual disminuye tu cantidad de movimiento de 10 a 20 veces el de un aterrizaje abrupto con las piernas rígidas. La fuerza resultante sobre tus huesos se reduce de 10 a 20 veces. Un luchador que se lanza al suelo trata de extender su tiempo de impacto con la lona al relajar sus músculos y extender el impacto en una serie de impactos más pequeños conforme su pie, rodilla, cadera, costillas y hombros sucesivamente golpean la lona. Desde luego, caer sobre una lona es preferible a caer sobre un suelo sólido porque la lona extiende el tiempo de frenado y, en consecuencia, reduce la fuerza de frenado.

La red de seguridad que usan los acróbatas de circo es un buen ejemplo de cómo lograr el impulso necesario para un aterrizaje seguro. La red de seguridad reduce la fuerza de frenado sobre un acróbata que cae porque aumenta en forma sustancial el tiempo de frenado. Si estás a punto de atrapar con la mano descubierta una rápida bola de béisbol, extiendes la mano hacia adelante a fin de tener mucho espacio para moverla hacia atrás después de hacer contacto con la pelota. Cuando extiendes el tiempo de contacto reduces la fuerza de la atrapada. De igual modo, un boxeador se mueve o rueda junto con el golpe para reducir la fuerza de contacto (Figura 6.8).

**FIGURA 6.7**
Un gran cambio en cantidad de movimiento durante un tiempo largo requiere una fuerza promedio lo suficientemente pequeña para que sea segura.

## Caso 3: disminución de la cantidad de movimiento durante un tiempo breve

Cuando boxeas, si te acercas al golpe en lugar de alejarte, estás en problemas porque el tiempo de contacto se reduce de modo que la fuerza aumenta. Lo mismo sucede si atrapas una pelota de béisbol que se mueve con gran rapidez mientras tu mano se acerca a la pelota en lugar de alejarse al contacto. O, cuando tu automóvil está fuera de control, si

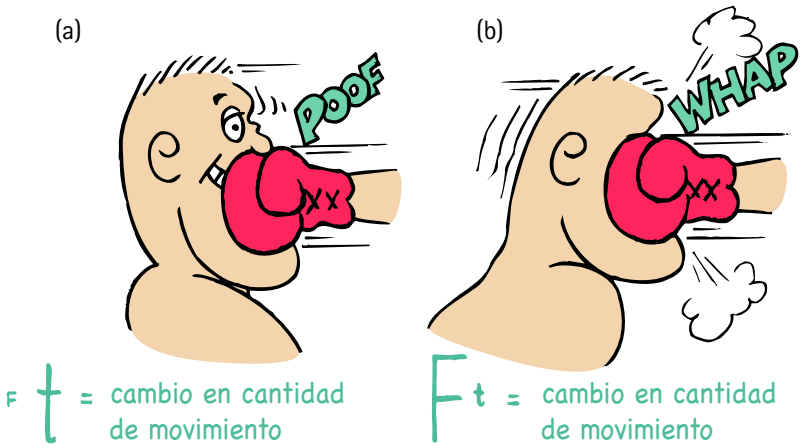



**FIGURA 6.8**
En ambos casos, el impulso proporcionado por la mandíbula del boxeador reduce la cantidad de movimiento del golpe. (a) Cuando el boxeador se aleja (se mueve junto con el golpe), extiende el tiempo y disminuye la fuerza. (b) Si el boxeador se mueve hacia el puño enguantado, el tiempo se reduce y debe soportar una fuerza más grande.

conduces hacia la pared de concreto en lugar de hacerlo hacia la pila de paja, realmente estás en problemas. En estos casos de tiempos de impacto cortos, las fuerzas de contacto son grandes. Recuerda que, para un objeto que se lleva al reposo, el impulso es el mismo sin importar cómo se detenga. Pero, si el tiempo es corto, la fuerza será grande.

La idea de tiempo de contacto corto explica cómo una experta en karate puede romper una pila de ladrillos con el golpe de su mano descubierta (Figura 6.9). Lleva el brazo y la mano rápidamente contra los ladrillos con una cantidad de movimiento considerable. Esta cantidad de movimiento se reduce rápidamente cuando asesta el impulso contra los ladrillos. El impulso es la fuerza de su mano contra los ladrillos multiplicada por el tiempo durante el cual su mano hace contacto con los ladrillos. Mediante una ejecución rápida, hace que el tiempo de contacto sea muy breve y en correspondencia hace que la fuerza del impacto sea enorme. Si la mano rebota en el impacto, la fuerza es incluso mayor.

**FIGURA 6.9**
Cassy imparte un gran impulso a los ladrillos en un tiempo breve y produce una fuerza considerable.

### PUNTO DE CONTROL

1. **Si el boxeador de la Figura 6.8 puede aumentar la duración del impacto tres veces más al moverse junto con el golpe, ¿en cuánto se reducirá la fuerza del impacto?**
2. **Si en vez de ello, el boxeador se mueve *hacia* el golpe, de modo que reduce la duración de impacto a la mitad, ¿en cuánto aumentará la fuerza del impacto?**
3. **Un boxeador que será golpeado intenta extender el tiempo para obtener mejores resultados, en tanto que un experto en karate asesta una fuerza en un tiempo corto para obtener mejores resultados. ¿No hay una contradicción aquí?**
4. **¿Cuándo el impulso es igual a la cantidad de movimiento?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La fuerza de impacto será sólo un tercio de lo que habría sido si no hubiera retrocedido.
2. La fuerza de impacto será dos veces mayor de lo que habría sido si hubiese mantenido la cabeza quieta. Los impactos de este tipo explican la mayoría de los nocauts.
3. No hay contradicción porque los mejores resultados para cada uno son muy diferentes. El mejor resultado para el boxeador es reducir la fuerza, lo que se logra si aumenta al máximo el tiempo, y el mejor resultado para el experto en karate es aumentar la fuerza suministrada en un tiempo mínimo.
4. Por lo general, el impulso es igual al *cambio* en la cantidad de movimiento. Si la cantidad de movimiento inicial de un objeto es cero cuando el impulso se aplica, entonces, cantidad de movimiento final = impulso aplicado. Y si un objeto se lleva al reposo, cantidad de movimiento inicial = impulso suministrado.

Diferentes fuerzas ejercidas durante diferentes intervalos de tiempo pueden producir el mismo impulso: $F_t$ o $F_t$

**VIDEO: Reducción de cantidad de movimiento durante un tiempo breve**

Una maceta soltada sobre tu cabeza rebota rápidamente. ¡Ay! Si el rebote tardara un tiempo más largo, como con una red de seguridad, entonces la fuerza del rebote sería mucho menor.

## 6.4 Rebote

Si una maceta cae desde un anaquel sobre tu cabeza, puedes estar en problemas. Si rebota de tu cabeza, el problema sería mayor. ¿Por qué? Porque los impulsos son mayores cuando un objeto rebota. El impulso necesario para detener un objeto y luego "lanzarlo de vuelta" es mayor que el impulso necesario simplemente para llevar el objeto a un alto total. Supón, por ejemplo, que atrapas con las manos la maceta que cae. Proporcionas un impulso para reducir su cantidad de movimiento a cero. Si lanzas la maceta arriba nuevamente, debes proporcionar impulso adicional. Esta mayor cantidad de impulso es la misma que el impulso que proporciona tu cabeza si la maceta rebota en ti.

Una de las fotografías que se incluyen al comienzo de este capítulo muestra al instructor de física Howie Brand balanceando un dardo contra un bloque de madera. Si el dardo tiene un clavo en su nariz, se detiene cuando queda pegado al bloque. El bloque permanece de pie. Cuando se quita el clavo y la nariz del dardo es la mitad de una bola de caucho sólida, el dardo rebota al contacto con el bloque. El bloque cae. La fuerza contra el bloque es mayor cuando hay rebote.

El hecho de que los impulsos son mayores cuando hay rebote se aprovechó con gran éxito durante la fiebre del oro en California. En esa época se usaban ruedas de álabes ineficaces en las operaciones de minado. Lester A. Pelton empleó el concepto de rebote y diseñó un álabe curvo que hacía que el agua entrante rebotara al impacto. El rebote del agua aumentó enormemente el impulso sobre la rueda.

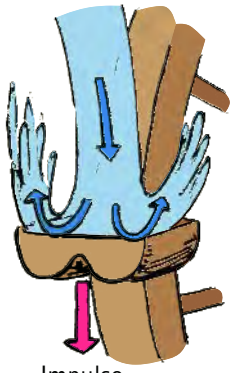



**FIGURA 6.10**
Una rueda Pelton. Los álabes curvos hacen que el agua rebote y dé una vuelta en U, lo que produce un mayor impulso para girar la rueda.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Con referencia a la Figura 6.9, ¿cuál es la diferencia entre la fuerza que Cassy ejerce sobre los ladrillos y la fuerza ejercida sobre su mano?**
2. **¿Cómo difiere el impulso resultante del impacto si su mano rebota al golpear los ladrillos?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. De acuerdo con la tercera ley de Newton, las fuerzas son iguales. Sólo la resistencia de la mano humana y el entrenamiento que ha recibido para poner la mano firme permiten la realización de esta hazaña sin romperse ningún hueso.
2. El impulso será mayor si su mano rebota de los ladrillos al momento del impacto. Si el tiempo de impacto no aumenta en correspondencia, entonces se ejercerá una mayor fuerza sobre los ladrillos (¡y su mano!).

## 6.5 Conservación de la cantidad de movimiento

La cantidad de movimiento se conserva en todas las colisiones, elásticas e inelásticas (siempre que no interfieran fuerzas externas).

Por la segunda ley de Newton sabes que, para acelerar un objeto, debes aplicarle una fuerza neta. Este capítulo afirma en gran parte lo mismo, pero con un lenguaje diferente. Si quieres cambiar la cantidad de movimiento de un objeto, ejerce un impulso sobre él.

Sólo un impulso externo a un sistema puede cambiar la cantidad de movimiento del sistema. Las fuerzas e impulsos internos no funcionan. Por ejemplo, las fuerzas moleculares dentro de una pelota de béisbol no tienen efecto sobre la cantidad de movimiento de la pelota, así como un empujón contra el tablero del automóvil en el que estás sentado no afecta la cantidad de movimiento del automóvil. Las fuerzas moleculares dentro de la pelota de béisbol y un empujón sobre el tablero son fuerzas internas. Vienen en pares balanceados que se cancelan a cero dentro del objeto. Para cambiar la cantidad de movimiento de la pelota o el automóvil se necesita un empujón o un tirón externo. Si no hay una fuerza externa, entonces no hay impulso externo, y no es posible el cambio en la cantidad de movimiento.

Como otro ejemplo, considera el cañón que se dispara en la Figura 6.11. La fuerza sobre la bala de cañón en el interior del barril del cañón es igual y opuesta a la fuerza que hace que el cañón recule. Dado que dichas fuerzas actúan durante el mismo tiempo, los impulsos también son iguales y opuestos. Recuerda la tercera ley de Newton acerca de las fuerzas de acción y reacción iguales y opuestas. También se aplica esto a los impulsos. Dichos impulsos son internos al sistema que comprende al cañón y a la bala de cañón, de modo que no cambian la cantidad de movimiento del sistema cañón-bala de cañón. Antes de disparar, el sistema está en reposo y la cantidad de movimiento es cero. Después de disparar, la cantidad de movimiento neta, o la cantidad de movimiento total *todavía* es cero. La cantidad de movimiento neta ni se gana ni se pierde.

**SCREENCAST: Conservación de la cantidad de movimiento**

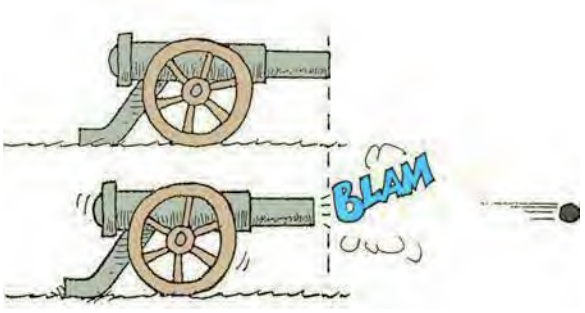



**FIGURA 6.11**
La cantidad de movimiento antes de disparar es cero. Después de disparar, la cantidad de movimiento neta sigue siendo cero porque la cantidad de movimiento del cañón es igual y opuesta a la cantidad de movimiento de la bala de cañón.

**pti**

- En la Figura 6.11, la mayor parte de la cantidad de movimiento de la bala de cañón se debe a su rapidez; la mayor parte de la cantidad de movimiento del cañón que recula se debe a su masa. De modo que $mV = mv$.

La cantidad de movimiento, como las cantidades de velocidad y fuerza, tiene tanto dirección como magnitud. Es una *cantidad vectorial.* Al igual que la velocidad y la fuerza, la cantidad de movimiento puede cancelarse. De modo que, aunque la bala de cañón en el ejemplo anterior adquiere cantidad de movimiento cuando se dispara y el cañón que recula gana cantidad de movimiento en la dirección opuesta, no hay ganancia en el *sistema* cañón-bala de cañón. Las cantidades de movimiento de la bala de cañón y del cañón son iguales en magnitud y opuestas en dirección.[2] Por tanto, como vectores, suman cero para el sistema en su conjunto. Dado que no actúa ninguna fuerza externa neta sobre el sistema, no hay impulso neto sobre el sistema y no hay cambio neto en la cantidad de movimiento. Puedes ver que, *si no actúa una fuerza neta o un impulso neto sobre un sistema, la cantidad de movimiento de dicho sistema no puede cambiar.*

[2]Aquí se desprecia la cantidad de movimiento de los gases expulsados de la pólvora que explota, la cual puede ser considerable. Disparar un arma con salvas a corta distancia definitivamente no debe hacerse debido a la considerable cantidad de movimiento de los gases expulsados. Más de una persona ha muerto por disparos de salvas a corta distancia. En 1998, un ministro en Jacksonville, Florida, le puso dramatismo a su sermón ante varios cientos de feligreses, incluida su familia, y se disparó en la cabeza con una salva de una Magnum calibre 0.357. Aunque no salió la bala del arma, sí salieron gases y fueron suficientes para ser mortales. De modo que, hablando de manera estricta, la cantidad de movimiento de la bala + la cantidad de movimiento de los gases expulsados es igual a la cantidad de movimiento opuesta del arma que recula.

**FIGURA 6.12**
Una bola blanca golpea una bola 8 frontalmente. Considera este evento en tres sistemas: (a) Una fuerza externa actúa sobre el sistema de la bola 8 y su cantidad de movimiento aumenta. (b) Una fuerza externa actúa sobre el sistema de la bola blanca y su cantidad de movimiento disminuye. (c) Ninguna fuerza externa actúa sobre el sistema bola blanca + bola 8, y la cantidad de movimiento se conserva (simplemente se transfiere de una parte del sistema a la otra).

Cuando la cantidad de movimiento, o cualquier cantidad en física, no cambia, se dice que se *conserva*. La idea de que la cantidad de movimiento se conserva cuando no actúan fuerzas externas se eleva a una ley central de la mecánica, llamada **ley de conservación de la cantidad de movimiento**, que afirma que:

**En ausencia de una fuerza externa, la cantidad de movimiento de un sistema permanece invariable.**

En cualquier sistema en el que todas las fuerzas sean internas (como, por ejemplo, automóviles que chocan, núcleos atómicos que experimentan decaimiento radiactivo o estrellas que explotan) la cantidad de movimiento neta del sistema antes y después del evento es la misma.

¿Puedes ver cómo las leyes de Newton se relacionan con la conservación de la cantidad de movimiento?

### PUNTO DE CONTROL

1. **La segunda ley de Newton afirma que, si no se ejerce fuerza neta sobre un sistema, no ocurre aceleración. ¿Eso significa que no ocurre ningún cambio en la cantidad de movimiento?**
2. **La tercera ley de Newton afirma que la fuerza que un cañón ejerce sobre una bala de cañón es igual y opuesta a la fuerza que la bala ejerce sobre el cañón. Entonces, ¿el *impulso* que el cañón ejerce sobre la bala es igual y opuesta al *impulso* que la bala ejerce sobre el cañón?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sí, porque el que no haya aceleración significa que no ocurre cambio en la velocidad o en la cantidad de movimiento (masa × velocidad). Otra línea de razonamiento es simplemente que la ausencia de una fuerza neta significa que no hay un impulso neto y, por tanto, no hay un cambio en la cantidad de movimiento.
2. Sí, porque la interacción entre ambos ocurre durante el mismo intervalo de *tiempo*. Dado que los tiempos son iguales y las fuerzas son iguales y opuestas, los impulsos *Ft* también son iguales y opuestos. El impulso es una cantidad vectorial y puede cancelarse.

## LEYES DE CONSERVACIÓN

Una ley de conservación especifica que ciertas cantidades de un sistema permanecen precisamente constantes, sin importar qué cambios ocurran en el interior del sistema. Es una ley de constancia durante el cambio. En este capítulo se observa que la cantidad de movimiento total es invariable durante las colisiones en tanto no actúe una fuerza externa durante la colisión. Se dice que la cantidad de movimiento se conserva. En el siguiente capítulo aprenderás que la energía se conserva cuando se transforma; la cantidad de energía en la luz, por ejemplo, se transforma por completo en energía térmica cuando la luz se absorbe. En el Capítulo 8 verás que la cantidad de movimiento angular se conserva: cualquiera que sea el movimiento rotacional de un sistema planetario, su cantidad de movimiento angular permanece invariable en tanto esté libre de influencias externas. En el Capítulo 22 aprenderás que la carga eléctrica se conserva, lo que significa que no puede crearse ni destruirse. Cuando estudies física nuclear, verás que ésta y otras leyes de conservación gobiernan el mundo submicroscópico. Las leyes de conservación son una fuente de profunda comprensión de la sencilla regularidad de la naturaleza y con frecuencia se consideran las leyes físicas más fundamentales. ¿Puedes pensar en cosas de tu propia vida que permanezcan constantes mientras otras cambian?

## 6.6 Colisiones

La cantidad de movimiento se conserva en las colisiones; esto es: la cantidad de movimiento neta de un sistema de objetos en colisión no cambia antes, durante o después de la colisión. Esto se debe a que las fuerzas que actúan durante la colisión son fuerzas internas: fuerzas que actúan y reaccionan en el interior del sistema. Sólo se redistribuye o se comparte cualquier cantidad de movimiento que exista antes de la colisión. En cualquier colisión se puede decir:

**Cantidad de movimiento neta antes de la colisión = cantidad de movimiento neta después de la colisión**

Esto es cierto sin importar cómo se muevan los objetos antes de chocar.

Cuando una bola de billar en movimiento choca de frente con otra bola de billar en reposo, la bola en movimiento llega al reposo y la otra bola se aleja con la rapidez de la bola que choca. A esto se le denomina **colisión elástica**; en condiciones ideales, los objetos que chocan rebotan sin deformación duradera o la generación de calor (Figura 6.13). Pero la cantidad de movimiento se conserva aun cuando los objetos en colisión queden unidos durante la colisión. Ésta es una **colisión inelástica**, que se caracteriza por la deformación o por la generación de calor o ambas. En una colisión perfectamente inelástica, ambos objetos quedan unidos. Piensa, por ejemplo, en el caso de un vagón de carga que se mueve sobre una vía y choca con otro vagón de carga en reposo (Figura 6.14). Si los vagones tienen igual masa y quedan acoplados por la colisión, ¿puedes predecir la velocidad de los vagones acoplados después del impacto?

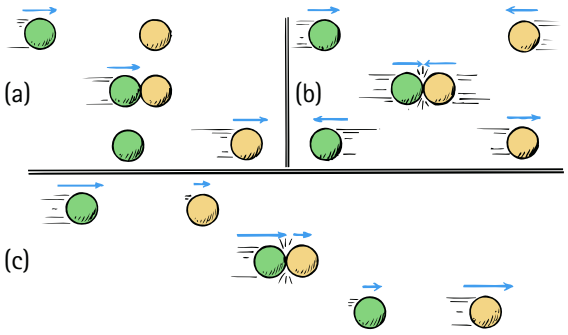



**FIGURA 6.13**
Colisiones elásticas de bolas igualmente masivas. (a) Una bola verde golpea una bola amarilla en reposo. (b) Una colisión frontal. (c) Una colisión de bolas que se mueven en la misma dirección. En cada caso, la cantidad de movimiento se transfiere de una bola a la otra.

Supón que un solo vagón se mueve a 10 metros por segundo (m/s) y que la masa de cada vagón es $m$. Entonces, de acuerdo con la conservación de la cantidad de movimiento,

$$(mv \text{ neta})_{\text{antes}} = (mv \text{ neta})_{\text{después}}$$

$$(m \times 10)_{\text{antes}} = (2m \times V)_{\text{después}}$$

Por simple álgebra, $V = 5$ m/s. Esto tiene sentido porque, dado que el doble de masa se mueve después de la colisión, la velocidad debe ser la mitad de la velocidad antes de la colisión. Entonces, ambos lados de la ecuación son iguales.

Observa las colisiones inelásticas que se muestran en la Figura 6.15. Si A y B se mueven con iguales cantidades de movimiento en direcciones opuestas (A y B chocan de frente), entonces una de ellas se considera negativa y las cantidades de movimiento suman algebraicamente cero. Después de la colisión, los restos acoplados permanecen en el punto de impacto, con cantidad de movimiento cero. Si, por otra parte, A y B se mueven en la misma dirección (A queda unido a B), la cantidad de movimiento neta es simplemente la suma de sus cantidades de movimiento individuales.

Sin embargo, si A se mueve hacia el este con, por decir, 10 unidades más de cantidad de movimiento que B, que se mueve hacia el oeste (no se muestra en la Figura 6.15), entonces, después de la colisión, los restos acoplados se mueven hacia el este con 10 unidades de

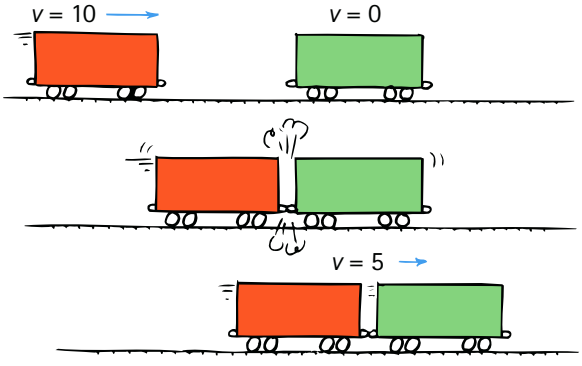



**FIGURA 6.14**
Colisión inelástica. La cantidad de movimiento del vagón de carga de la izquierda se comparte con el vagón de carga de igual masa a la derecha después de la colisión.

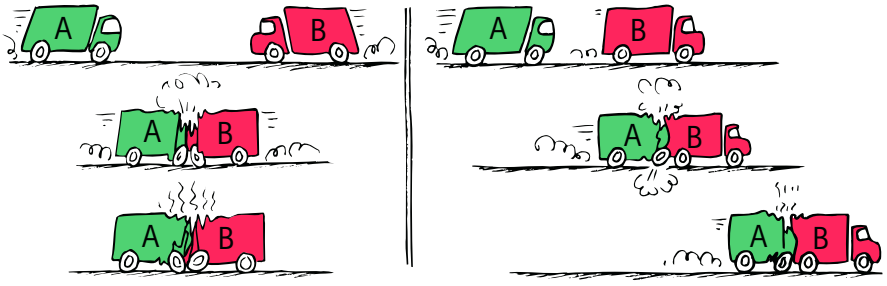



**FIGURA 6.15**
Colisiones inelásticas. La cantidad de movimiento neta de los camiones antes y después de la colisión es la misma.

cantidad de movimiento. Desde luego, los restos finalmente llegarán al reposo debido a la fuerza de fricción externa del suelo. No obstante, el tiempo de impacto es corto y la fuerza de impacto de la colisión es mucho mayor que la fuerza de fricción externa, de modo que, para fines prácticos, la cantidad de movimiento inmediatamente antes y después de la colisión se conserva. La cantidad de movimiento neta justo antes de que los camiones choquen (10 unidades) es igual a la cantidad de movimiento combinada de los camiones estropeados justo después del impacto (10 unidades). El mismo principio se aplica a naves espaciales que se acoplan suavemente, donde la fricción está ausente por completo. Su cantidad de movimiento neta justo antes de acoplarse se conserva y es igual a su cantidad de movimiento neta justo después de acoplarse.

Galileo trabajó mucho para producir superficies lisas que redujeran al mínimo la fricción. ¡Le habría encantado experimentar con las pistas de aire actuales!

**FIGURA 6.16**
Will Maynez demuestra su pista de aire. Chorros de aire provenientes de pequeños orificios proporcionan una superficie sin fricción para que los carros se deslicen sobre ella.

**PUNTO DE CONTROL**

**Considera la pista de aire de la Figura 6.16. Supón que un carro deslizador, con una masa de 0.5 kg, choca con un carro estacionario que tiene una masa de 1.5 kg y se queda pegado. Si la rapidez del carro deslizador antes de la colisión es $v_{antes}$, ¿cuán rápido se deslizarán los carros acoplados después de la colisión?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

De acuerdo con la conservación de la cantidad de movimiento, la cantidad de movimiento del carro de 0.5 kg antes de la colisión = cantidad de movimiento de ambos carros pegados después de la colisión:

$$(0.5\text{ kg})\, v_{antes} = (0.5\text{ kg} + 1.5\text{ kg})\, v_{después}$$

$$v_{después} = \frac{(0.5\text{ kg})\, v_{antes}}{(0.5 + 1.)\text{ kg}} = \frac{0.5\, v_{antes}}{2} = \frac{v_{antes}}{4}$$

Esto tiene sentido porque, después de la colisión, se moverá cuatro veces más masa, de modo que los carros acoplados se deslizarán a 1/4 de rapidez.

Para un ejemplo numérico de conservación de la cantidad de movimiento, piensa en un pez que nada hacia un pez más pequeño en reposo y se lo traga (Figura 6.17). Si el pez más grande tiene una masa de 5 kg y nada a 1 m/s hacia un pez de 1 kg, ¿cuál es la velocidad del pez más grande inmediatamente después de almorzar? Desprecia los efectos de la resistencia del agua.

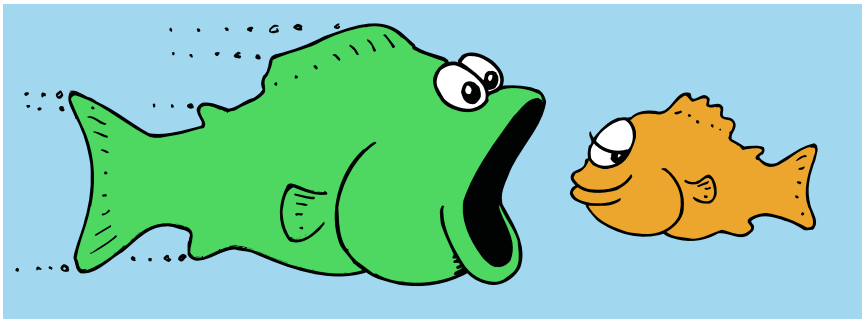


**FIGURA 6.17**
Dos peces constituyen un sistema, que tiene la misma cantidad de movimiento justo antes del almuerzo y justo después del almuerzo.

**SCREENCAST: Problema de la cantidad de movimiento del pez que almuerza**

**SCREENCAST: Problema de la cantidad de movimiento del sapo Fred**

Para responder esta pregunta puedes usar conservación de cantidad de movimiento:

$$\begin{array}{c}\text{Cantidad de movimiento} \\ \text{neta antes del almuerzo}\end{array} = \begin{array}{c}\text{Cantidad de movimiento} \\ \text{neta después del almuerzo}\end{array}$$

$$(5\text{ kg})(1\text{ m/s}) + (1\text{ kg})(0\text{ m/s}) = (5\text{ kg} + 1\text{ kg})v$$

$$5\text{ kg}\cdot\text{m/s} = (6\text{ kg})v$$

$$v = 5/6\text{ m/s}$$

Puedes ver que el pez pequeño no tiene cantidad de movimiento antes de almorzar porque su velocidad es cero. Después de almorzar, la masa combinada de ambos peces se mueve con velocidad $v$, que, por simple álgebra, se ve que es 5/6 m/s. Esta velocidad está en la misma dirección que la del pez más grande.

Supón que el pez pequeño de este ejemplo no está en reposo, sino que nada hacia la izquierda con una velocidad de 4 m/s. Nada en una dirección opuesta a la del pez más grande: una dirección negativa, si la dirección del pez más grande se considera positiva. En este caso:

$$\begin{array}{c}\text{Cantidad de movimiento} \\ \text{neta antes del almuerzo}\end{array} = \begin{array}{c}\text{Cantidad de movimiento} \\ \text{neta después del almuerzo}\end{array}$$

$$(5\text{ kg})(1\text{ m/s}) + (1\text{ kg})(-4\text{ m/s}) = (5\text{ kg} + 1\text{ kg})v$$

$$(5\text{ kg}\cdot\text{m/s}) - (4\text{ kg}\cdot\text{m/s}) = (6\text{ kg})v$$

$$1\text{ kg}\cdot\text{m/s} = 6\text{ kg}\,v$$

$$v = 1/6\text{ m/s}$$

Observa que la cantidad de movimiento negativa del pez más pequeño antes de almorzar efectivamente hace más lento al pez más grande después de almorzar. Si el pez más pequeño nadara el doble de rápido, entonces

$$\begin{array}{c}\text{Cantidad de movimiento} \\ \text{neta antes del almuerzo}\end{array} = \begin{array}{c}\text{Cantidad de movimiento} \\ \text{neta después del almuerzo}\end{array}$$

$$(5\text{ kg})(1\text{ m/s}) + (1\text{ kg})(-8\text{ m/s}) = (5\text{ kg} + 1\text{ kg})v$$

$$(5\text{ kg}\cdot\text{m/s}) - (8\text{ kg}\cdot\text{m/s}) = (6\text{ kg})v$$

$$-3\text{ kg}\cdot\text{m/s} = 6\text{ kg}\,v$$

$$v = -1/2\,\text{m/s}$$

Aquí se observa que la velocidad final es –1/2 m/s. ¿Cuál es el significado del signo menos? Significa que la velocidad final es *opuesta* a la velocidad inicial del pez más grande. Después de almorzar, el sistema de dos peces se mueve hacia la izquierda. Se deja como problema de final de capítulo el encontrar la velocidad inicial del pez más pequeño que detendría al pez más grande en su camino.

## 6.7 Colisiones más complicadas

A diferencia de las bolas de billar después de una colisión, las partículas nucleares no experimentan arrastre aerodinámico u otra fricción. Si no se desvían mediante fuerzas eléctricas o magnéticas, vuelan en líneas rectas sin perder rapidez hasta golpear a otra partícula o experimentar un decaimiento radiactivo.

La cantidad de movimiento neta permanece invariable en cualquier colisión, sin importar el ángulo entre las trayectorias de los objetos en colisión. Cuando se involucran diferentes direcciones, la cantidad de movimiento neta puede expresarse con la regla del paralelogramo de suma de vectores. Aquí no se abordarán con mucho detalle tales casos complicados, pero se mostrarán algunos ejemplos sencillos para dar a entender el concepto.

En la Figura 6.18 se observa una colisión entre dos automóviles que viajan en ángulos rectos uno con respecto al otro. El automóvil A tiene una cantidad de movimiento dirigida hacia el este, y la cantidad de movimiento del automóvil B se dirige hacia el norte. Si sus cantidades de movimiento individuales son iguales en magnitud, entonces su cantidad de movimiento combinada está en una dirección hacia el noreste. Ésta es la dirección en la que viajarán los automóviles acoplados después de la colisión. Se observa que, tal como la diagonal de un cuadrado no es igual a la suma de dos de los lados, la magnitud de la cantidad de movimiento resultante no será simplemente igual a la suma aritmética de las dos cantidades de movimiento antes de la colisión. Recuerda la relación entre la diagonal de un cuadrado y la longitud de uno de sus lados (Figura 2.9 en el Capítulo 2): la diagonal es $\sqrt{2}$ veces la longitud del lado de un cuadrado. De modo que, en este ejemplo, la magnitud de la cantidad de movimiento resultante será igual a $\sqrt{2}$ veces la cantidad de movimiento de cualquier vehículo.

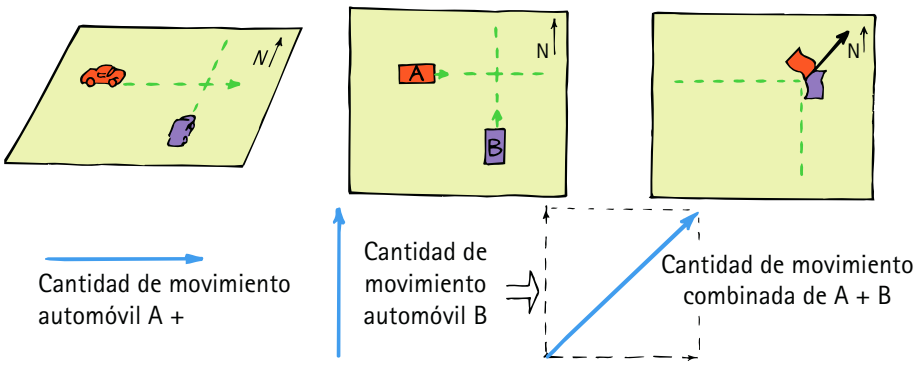



**FIGURA 6.18**
La cantidad de movimiento es una cantidad vectorial.

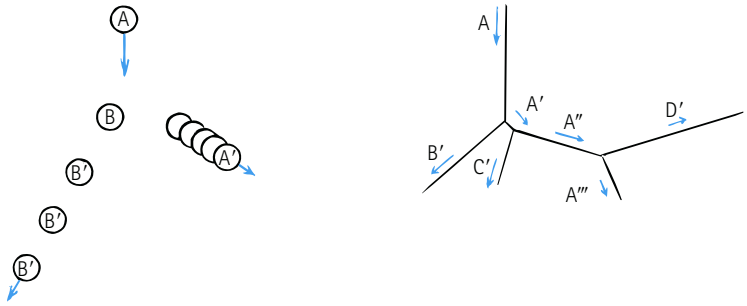



**FIGURA 6.19**
La cantidad de movimiento se conserva en las bolas de billar que chocan y en partículas nucleares que chocan en una cámara de burbujas de hidrógeno líquido. (a) La bola de billar A golpea a la bola de billar B, que inicialmente estaba en reposo. (b) El protón A choca sucesivamente con los protones B, C y D. Los protones en movimiento dejan trazas de pequeñas burbujas.

La Figura 6.20 muestra un petardo que cae y explota en dos pedazos. Las cantidades de movimiento de los fragmentos se combinan mediante suma vectorial para igualar la cantidad de movimiento original del petardo que cae. La Figura 6.19b extiende esta idea al reino microscópico, donde las trazas de partículas subatómicas se revelan en una cámara de burbujas de hidrógeno líquido.

Cualquiera que sea la naturaleza de una colisión o cuán complicada sea, la cantidad de movimiento total antes, durante y después permanece invariable. Esta ley extremadamente útil permite aprender mucho de las colisiones sin conocimiento alguno de las fuerzas que actúan en una colisión. En el siguiente capítulo verás que la energía, acaso en múltiples formas, también se conserva. Si aplicas la conservación de cantidad de movimiento y de energía a las colisiones de partículas subatómicas como se observan en varias cámaras de detección, puedes calcular las masas de estas pequeñas partículas. Esta información se obtiene al determinar las cantidades de movimiento y la energía antes y después de las colisiones.

La conservación de la cantidad de movimiento y la conservación de la energía (que se estudiará en el siguiente capítulo) son las dos herramientas más poderosas de la mecánica. Su aplicación produce información detallada que va desde hechos acerca de las interacciones de partículas subatómicas hasta la estructura y el movimiento de galaxias enteras.

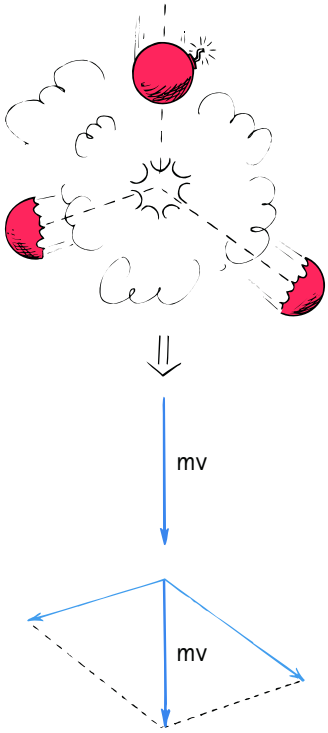



**FIGURA 6.20**
Después de la explosión del petardo, las cantidades de movimiento de sus fragmentos se suman (mediante suma vectorial) para producir la cantidad de movimiento original.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Cantidad de movimiento.** Producto de la masa de un objeto y su velocidad.

**Impulso.** El producto de la fuerza que actúa sobre un objeto y el tiempo durante el cual ésta actúa.

**Relación impulso-cantidad de movimiento.** El impulso es igual al cambio en la cantidad de movimiento del objeto sobre el que actúa el impulso. En notación simbólica,

$$Ft = \Delta mv$$

**Ley de conservación de la cantidad de movimiento.** En ausencia de una fuerza externa, la cantidad de movimiento de un sistema permanece invariable. Por tanto, la cantidad de movimiento antes de un evento que sólo involucra fuerzas internas es igual a la cantidad de movimiento después del evento:

$$mv_{\text{(antes del evento)}} = mv_{\text{(después del evento)}}$$

**Colisión elástica.** Colisión en la que los objetos rebotan sin deformación duradera o generación de calor.

**Colisión inelástica.** Colisión en la que los objetos se distorsionan, generan calor y posiblemente quedan unidos.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 6.1 Cantidad de movimiento

1. ¿Cuál tiene mayor cantidad de movimiento: un pesado camión en reposo o una patineta en movimiento?

### 6.2 Impulso

2. Distingue entre fuerza e impulso.
3. ¿Cuáles son las dos formas para aumentar el impulso?
4. Para la misma fuerza, ¿por qué un cañón largo imparte más rapidez a una bala que un cañón corto?

### 6.3 El impulso cambia la cantidad de movimiento

5. ¿Cómo es que la relación impulso-cantidad de movimiento se relaciona con la segunda ley de Newton?
6. Para impartir el mayor impulso a un objeto, ¿debes ejercer la mayor fuerza posible, extender dicha fuerza durante el mayor tiempo posible, o ambos? Explica.
7. Cuando te golpea un objeto en movimiento, ¿es favorable que el objeto haga contacto contigo durante un tiempo breve o durante un tiempo largo? Explica.

8. En karate, ¿por qué es más efectiva una fuerza que se aplica durante un tiempo breve?
9. En boxeo, ¿por qué es conveniente moverse en el mismo sentido del golpe?

### 6.4 Rebote

10. ¿Cuál experimenta mayor cambio en la cantidad de movimiento: a) una pelota de béisbol que es atrapada, b) una pelota de béisbol que se lanza o c) una pelota de béisbol que es atrapada y luego lanzada de vuelta, si todas las pelotas tienen la misma rapidez justo antes de ser atrapadas y justo después de ser lanzadas?
11. En la pregunta anterior, ¿cuál caso requiere el mayor impulso?

### 6.5 Conservación de la cantidad de movimiento

12. ¿Puedes producir un impulso neto sobre un automóvil si te sientas en su interior y empujas sobre el tablero? ¿Las fuerzas internas dentro de un balón de *soccer* pueden producir un impulso sobre el balón que cambie su cantidad de movimiento?
13. ¿Es correcto decir que, si no se ejerce impulso neto sobre un sistema, entonces no ocurrirá cambio en la cantidad de movimiento del sistema?
14. ¿Qué significa decir que la cantidad de movimiento (o cualquier cantidad) se *conserva*?
15. Cuando una bala de cañón se dispara, la cantidad de movimiento se conserva para el *sistema* cañón + bala. ¿La cantidad de movimiento se conservaría para el sistema si la cantidad de movimiento no fuese una cantidad vectorial? Explica.

### 6.6 Colisiones

16. ¿En cuál se conserva la cantidad de movimiento: en una *colisión elástica* o en una *colisión inelástica*?
17. El vagón de ferrocarril A rueda con cierta rapidez y realiza una colisión perfectamente elástica con el vagón B de la misma masa. Después de la colisión, se observa que el vagón A está en reposo. ¿Cómo se compara la rapidez final del vagón B con la rapidez inicial del vagón A?
18. Si los vagones igualmente masivos de la pregunta anterior quedan unidos después de chocar inelásticamente, ¿cuál es la diferencia entre su rapidez después de la colisión y la rapidez inicial del vagón A?

### 6.7 Colisiones más complicadas

19. Supón que una bola de masilla, que se mueve de forma horizontal con 1 kg · m/s de cantidad de movimiento, choca y queda unida a una bola de masilla idéntica que se mueve verticalmente con 1 kg · m/s de cantidad de movimiento. ¿Cuál es la magnitud de su cantidad de movimiento combinada?
20. En la pregunta anterior, ¿cuál es la cantidad de movimiento total de las bolas de masilla antes y después de la colisión?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

21. Cuando estés un poco adelantado en tus estudios, falta a clases alguna tarde y visita tu salón de billar local y ponte al día en la conservación de la cantidad de movimiento. Observa que, sin importar cuán complicadas sean las colisiones de las bolas, la cantidad de movimiento a lo largo de la línea de acción de la bola blanca antes del impacto es la misma que la cantidad de movimiento combinada de todas las bolas a lo largo de esta dirección después del impacto, y que los componentes de la cantidad de movimiento perpendiculares a esta línea de acción se cancelan en cero después del impacto, el mismo valor que antes del impacto en esta dirección. Verás más claramente tanto la naturaleza vectorial de la cantidad de movimiento como su conservación cuando no se imparte derrape rotacional ("english") a la bola blanca. Cuando se aplica efecto al golpear la bola blanca fuera del centro, la cantidad de movimiento rotacional, que también se conserva, complica un poco el análisis. Pero, sin importar cómo se golpee la bola blanca, siempre se conservará la cantidad de movimiento, tanto lineal como rotacional. Tanto el pool como el billar ofrecen demostraciones excelentes de la conservación de la cantidad de movimiento en acción.

## SUSTITUYE Y LISTO (FAMILIARIZACIÓN CON ECUACIONES)

**Cantidad de movimiento = $mv$**

22. ¿Cuál es la cantidad de movimiento de una bola de boliche de 8 kg que rueda a 2 m/s?
23. ¿Cuál es la cantidad de movimiento de una caja de 50 kg que se desliza a 4 m/s por una superficie de hielo?

**Impulso = $Ft$**

24. ¿Qué impulso ocurre cuando una fuerza promedio de 10 N se ejerce sobre un carro durante 2.5 s?
25. ¿Qué impulso ocurre cuando la misma fuerza de 10 N actúa sobre el carro durante el doble de tiempo?

**Impulso = cambio en la cantidad de movimiento: $Ft = mv$**

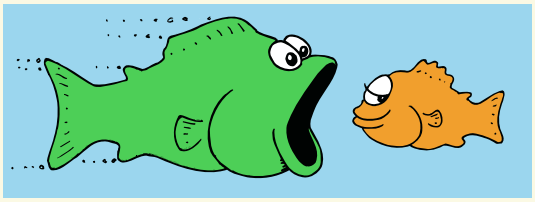
26. ¿Cuál es el impulso sobre una bola de 8 kg que rueda a 2 m/s cuando choca con una almohada y se detiene?
27. ¿Cuánto impulso detiene una caja de 50 kg que se desliza a 4 m/s cuando encuentra una superficie rugosa?

**Conservación de cantidad de movimiento: $mv_{\text{antes}} = mv_{\text{después}}$**

28. Una bola de masilla de 2 kg, que se mueve a 3 m/s, choca con una bola de masilla de 2 kg en reposo. Demuestra que la rapidez de las dos bolas de masilla unidas, inmediatamente después de la colisión, es de 1.5 m/s.

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

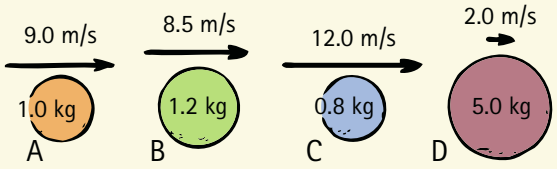
29. Barry, el jugador de bolos, se pregunta cuánto impulso es necesario para detener una bola de boliche de 10 kg que se mueve a 6 m/s. ¿Cuál es tu respuesta?
30. Joanne conduce su automóvil, con una masa de 1,000 kg, a una rapidez de 20 m/s. Demuestra que, para llevar su automóvil a alto total en 10 s, la fricción del camino debe ejercer una fuerza de 2,000 N sobre el automóvil.
31. Un automóvil, que lleva un maniquí de ensayo de 75 kg, choca con una pared a 25 m/s y llega al reposo en 0.1 s. Demuestra que la fuerza promedio ejercida por el cinturón de seguridad sobre el maniquí es 18,750 N.
32. Betty (masa: 40 kg), que está de pie sobre hielo resbaladizo, atrapa a su perro que salta (masa: 15 kg) y que se mueve horizontalmente a 3.0 m/s. Demuestra que la rapidez de Betty y su perro después de atraparlo es de aproximadamente 0.8 m/s.
33. Una bola de masilla de 2 kg que se mueve hacia la derecha tiene una colisión inelástica frontal con una bola de masilla de 1 kg que se mueve hacia la izquierda. Si la masa combinada no se mueve justo después de la colisión, ¿qué puedes concluir acerca de las rapideces relativas de las bolas antes de la colisión?
34. Un motor diesel de ferrocarril pesa cuatro veces más que un vagón de carga. Si el motor diesel se mueve a 5 km/h hacia un vagón de carga que inicialmente está en reposo, demuestra que la rapidez del motor y el vagón acoplados es de 4 km/h.
35. Un pez de 5 kg, que nada a 1 m/s, traga un distraído pez de 1 kg que nada hacia él con una rapidez que lleva a ambos peces a un alto total inmediatamente después del almuerzo. Demuestra que la rapidez del pez más pequeño que se aproxima, antes del almuerzo, debió ser de 5 m/s.



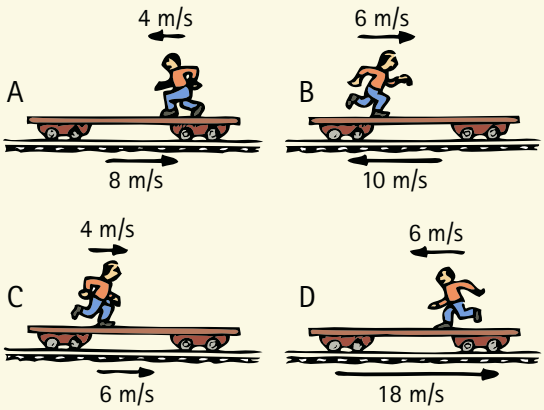
36. El superhéroe de las tiras cómicas encuentra un asteroide en el espacio exterior y lo lanza violentamente a 800 m/s, tan rápido como una bala. El asteroide es mil veces más masivo que el superhéroe. En la tira cómica, el superhéroe se ve en reposo después del lanzamiento. Si tienes en cuenta la física, ¿cuál sería su velocidad de retroceso?
37. Dos automóviles, cada uno con 1,000 kg de masa, se mueven con la misma rapidez, 20 m/s, cuando chocan y quedan unidos. ¿En qué dirección y con qué rapidez se mueven los restos a) si un automóvil se conducía hacia el norte y uno al sur, y b) si un automóvil se conducía al norte y uno al este (como se muestra en la Figura 6.18)?
38. Un huevo de avestruz de masa $m$ se lanza con una rapidez $v$ hacia una sábana pandeada y llega al reposo en un tiempo $t$.
    a. Demuestra que la fuerza que actúa sobre el huevo cuando golpea la sábana es $mv/t$.
    b. Si la masa del huevo es 1 kg, su rapidez inicial es 2 m/s y el tiempo para detenerse es 0.2 s, demuestra que la fuerza promedio sobre el huevo es 10 N.

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

39. Las bolas que se muestran tienen diferentes masas y rapideces. Clasifica lo siguiente de mayor a menor:

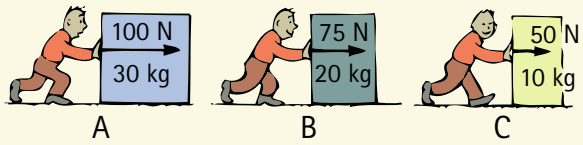



    a. Las cantidades de movimiento.
    b. Los impulsos necesarios para detener las bolas.
40. Trotador Jake corre a lo largo de la plataforma de un ferrocarril que se mueve con las velocidades mostradas. En cada caso, la velocidad de Jake está dada en relación con la plataforma. Llama positiva la dirección hacia la derecha. Clasifica los siguientes de mayor a menor:
    a. La magnitud de las cantidades de movimiento de Jake en relación con la plataforma.



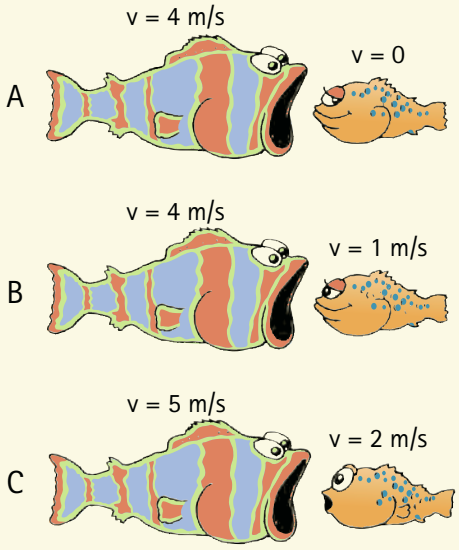

    b. Las cantidades de movimiento de Jake en relación con un observador estacionario sobre el suelo.

41. Marshall empuja cajas desde el reposo por el piso de su salón de clase durante 3 s, con una fuerza neta como se muestra. Por cada caja, clasifica lo siguiente de mayor a menor:




   a. Impulso suministrado
   b. Cambios en la cantidad de movimiento
   c. Rapideces finales
   d. Cantidades de movimiento en 3 s

42. Un pez hambriento está a punto de almorzar con las rapideces mostradas. Supón que el pez hambriento tiene una masa cinco veces la masa del pez pequeño. Inmediatamente después de almorzar, clasifica de mayor a menor las rapideces del pez que antes estaba hambriento.

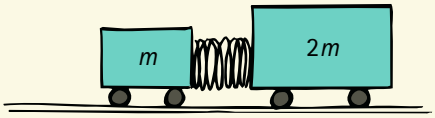



## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

43. Cuando un supertanque se lleva al alto, sus motores por lo general se apagan aproximadamente a 25 km del puerto. ¿Por qué es tan difícil detener o girar un supertanque?
44. En términos de impulso y de cantidad de movimiento, ¿por qué los tableros acolchados hacen más seguros a los automóviles?
45. En términos de impulso y cantidad de movimiento, ¿por qué las bolsas de aire en los automóviles reducen el riesgo de lesión en los accidentes?
46. ¿Por qué los gimnastas usan colchonetas de piso que son muy gruesas?
47. En términos de impulso y cantidad de movimiento, ¿por qué los montañistas prefieren las sogas de nailon, que se estiran mucho bajo tensión?
48. ¿Por qué sería un error peligroso el que un saltador de *bungee* use un cable de acero en lugar de una cuerda elástica?
49. Cuando saltas desde una altura significativa, ¿por qué es conveniente aterrizar con las rodillas un poco dobladas?
50. Una persona puede sobrevivir a un impacto con los pies por delante a rapideces de aproximadamente 12 m/s (27 mi/h) en concreto, 15 m/s (34 mi/h) en tierra, y 34 m/s (76 mi/h) en agua. ¿Cuál es la razón por la que hay diferentes valores para distintas superficies?
51. Cuando atrapas una rápida bola de béisbol con la mano descubierta, ¿por qué es importante extender la mano hacia adelante para atraparla?
52. ¿Por qué sería una mala idea tener el dorso de la mano contra la pared del jardín cuando atrapas una bola en un largo elevado?
53. Hace muchos años los automóviles se fabricaban para que fueran lo más rígido posible, mientras que los automóviles de hoy están diseñados para arrugarse al impacto. ¿Por qué?
54. En términos de impulso y cantidad de movimiento, ¿por qué es importante que las aspas de los helicópteros desvíen el aire hacia abajo?
55. Un vehículo lunar se pone a prueba sobre la Tierra con una rapidez de 10 km/h. Cuando viaja igual de rápido en la Luna, ¿su cantidad de movimiento es mayor, menor o la misma?
56. No puedes lanzar un huevo crudo contra una pared sin romperlo. Pero Peter Hopkinson puede lanzar un huevo con la misma rapidez hacia una sábana pandeada sin romperlo. Explica con los conceptos de este capítulo.

57. ¿Por qué es difícil que un bombero sostenga una manguera que arroja grandes cantidades de agua a gran rapidez?
58. ¿Estarías a salvo si dispararas un arma que tuviera una bala 10 veces más masiva que el arma? Explica.
59. ¿Por qué los impulsos que ejercen mutuamente los objetos que chocan son iguales y opuestos?
60. Si una bola se proyecta hacia arriba desde el suelo con 10 kg·m/s de cantidad de movimiento, ¿cuál es la cantidad de retroceso de la Tierra? ¿Por qué no se siente esto?
61. Cuando una manzana cae de un árbol y golpea el suelo sin rebotar, ¿qué pasa con su cantidad de movimiento?
62. ¿Por qué la manopla de un receptor de béisbol tiene más acolchonado que un guante convencional?

63. ¿Por qué los guantes de box de 8 onzas golpean más fuerte que los guantes de 16 onzas?
64. Tú saltas desde una canoa hacia el muelle cercano y esperas un aterrizaje sencillo. En vez de ello, caes en el agua. ¿Cuál es tu explicación para este contratiempo?
65. Explica cómo una nube de insectos voladores puede tener una cantidad de movimiento neta de cero.
66. ¿Cómo una persona completamente vestida, en reposo, en medio de un estanque sobre hielo perfectamente sin fricción, puede llegar a la orilla?
67. Si lanzas una bola horizontalmente mientras estás de pie sobre patines de ruedas, rodarás hacia atrás con una cantidad de movimiento que coincide con la de la bola. ¿Rodarás hacia atrás si realizas los movimientos de lanzar la bola, pero no sueltas la bola? Explica.
68. Los ejemplos de los dos ejercicios anteriores pueden explicarse en términos de conservación de la cantidad de movimiento y en términos de la tercera ley de Newton. En caso de que hayas respondido en términos de la conservación de la cantidad de movimiento, respóndelos también en términos de la tercera ley de Newton (o viceversa, si ya respondiste en términos de la tercera ley de Newton).
69. He aquí el conocido par de carros unidos con un resorte. ¿Cuáles son las rapideces relativas de los carros cuando se suelta el resorte?




70. Si colocas una caja sobre un plano inclinado, éste adquiere cantidad de movimiento a medida que se desliza hacia abajo. ¿A qué se debe este cambio en la cantidad de movimiento?
71. Tu amigo dice que la ley de conservación de la cantidad de movimiento se rompe cuando una bola rueda colina abajo y gana cantidad de movimiento. ¿Tú qué opinas?
72. ¿Qué se entiende por *sistema*, y cómo se relaciona con la conservación de la cantidad de movimiento?
73. Si lanzas una bola hacia arriba, ¿se conserva la cantidad de movimiento de la bola en movimiento? ¿Se conserva la cantidad de movimiento del sistema que consiste de bola + Tierra? Explica tus respuestas.
74. La cantidad de movimiento de una manzana que cae al suelo no se conserva porque la fuerza de gravedad externa actúa sobre ella. Pero la cantidad de movimiento se conserva en un sistema más grande. Explica.
75. Suelta una piedra desde lo alto de un gran risco. Identifica el sistema en el que la cantidad de movimiento neta sea cero a medida que cae la piedra.
76. Mientras lanzas una bola hacia arriba, ¿existe un cambio en la fuerza normal sobre tus pies? ¿Existe un cambio cuando atrapas la bola? (Piensa que haces esto mientras estás de pie en una báscula de baño.)
77. Cuando viajas en tu automóvil a rapidez de autopista, la cantidad de movimiento de un bicho cambia súbitamente cuando se aplasta en tu parabrisas. Comparado con el cambio en la cantidad de movimiento del bicho, ¿en cuánto cambia la cantidad de movimiento de tu automóvil?
78. Si una bola de tenis y una bola de boliche chocan a mitad del aire, ¿cada una experimenta la misma cantidad de cambio en cantidad de movimiento? Defiende tu respuesta.
79. Si un camión Mack y un MiniCooper tienen una colisión frontal, ¿cuál vehículo experimentará la mayor fuerza de impacto? ¿El mayor impulso? ¿El mayor cambio en cantidad de movimiento? ¿La mayor desaceleración?
80. ¿Una colisión frontal entre dos automóviles es más dañina para los ocupantes si los vehículos quedan unidos o si rebotan al impacto?
81. Un carro de 0.5 kg sobre una pista de aire se mueve a 1.0 m/s hacia la derecha, y se dirige hacia un carro de 0.8 kg que se mueve hacia la izquierda a 1.2 m/s. ¿Cuál es la dirección de la cantidad de movimiento del sistema de dos carros?
82. Dos carros idénticos en una mesa de aire se mueven en ángulos rectos mutuos y tienen una colisión completamente inelástica. ¿Cuál es la diferencia entre su cantidad de movimiento combinada y la cantidad de movimiento inicial de cada carro?
83. En una película, el héroe salta recto hacia abajo desde un puente sobre un pequeño bote que sigue moviéndose sin cambiar su velocidad. ¿Qué propiedad física se rompe aquí?
84. Para lanzar una bola, ¿ejerces un impulso sobre ella? ¿Ejerces un impulso para atraparla con la misma rapidez? ¿Aproximadamente cuánto impulso ejerces, en comparación, si la atrapas e inmediatamente la lanzas de vuelta? (Imagina que estás sobre una patineta.)
85. Con referencia a la Figura 6.9, ¿cómo cambiará el impulso al impacto si la mano de Cassy rebota al golpear los ladrillos? En cualquier caso, ¿cuál es la diferencia entre la fuerza ejercida sobre los ladrillos y la fuerza ejercida sobre su mano?

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

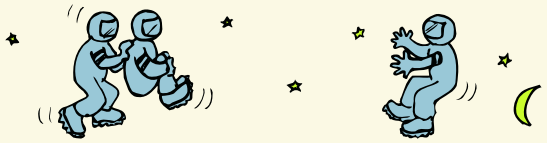
86. Por lo general es mucho más difícil detener un pesado camión que un patinador cuando se mueven con la misma rapidez. Discute por qué la patineta en movimiento pudiera requerir más fuerza de frenado. (Considera tiempos relativos.)
87. Un boxeador puede golpear un pesado saco durante más de una hora sin cansarse, pero se cansará rápidamente cuando boxee con un oponente durante algunos minutos. ¿Por qué? (*Sugerencia:* cuando el puño del boxeador se dirige al saco, ¿qué proporciona el impulso para detener el golpe? Cuando el puño del boxeador se dirige al oponente, ¿qué o quién proporciona el impulso para detener los golpes que no conecta?)
88. Los vagones de ferrocarril están holgadamente acoplados, de modo que existe un considerable tiempo de demora desde el momento en que el primer vagón se mueve hasta que los últimos vagones se mueven desde el reposo por la locomotora. Discute la conveniencia de este acoplamiento

holgado entre vagones desde el punto de vista del impulso y de la cantidad de movimiento.

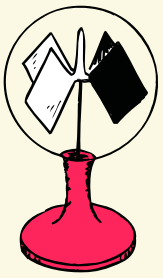
89. Si sólo una fuerza externa puede cambiar la velocidad de un cuerpo, ¿cómo la fuerza interna de los frenos puede llevar al reposo a un automóvil en movimiento?
90. En el Capítulo 5, la propulsión de cohetes se explicó en términos de la tercera ley de Newton; esto es: la fuerza que impulsa un cohete proviene de los gases de escape que empujan contra el cohete, la reacción a la fuerza que ejerce el cohete sobre los gases de escape. Discute y explica la propulsión de cohetes en términos de conservación de la cantidad de movimiento.
91. Discute cómo la conservación de la cantidad de movimiento es una consecuencia de la tercera ley de Newton.
92. Un carro sale disparado de un risco y choca en el suelo del cañón abajo. Identifica el sistema en el que la cantidad de movimiento neta sea cero durante el choque.
93. Bronco salta desde un helicóptero que flota y descubre que aumenta su cantidad de movimiento. ¿Esto viola la conservación de la cantidad de movimiento? Explica.
94. Un velero de hielo se pone en un lago congelado en un día sin viento. El navegante coloca un ventilador como se muestra. Si todo el viento rebota hacia atrás desde la vela, ¿el velero se pondrá en movimiento? Si es así, ¿en qué dirección?

95. Discute si tu respuesta al ejercicio anterior sería o no diferente si el aire se detuviera en la vela sin rebotar.
96. Discute la conveniencia de simplemente quitar la vela en los ejercicios anteriores.
97. ¿Cuál ejerce el impulso más grande sobre una placa de acero: las balas de ametralladora que rebotan de la placa o las mismas balas que se deforman y quedan pegadas a la placa?
98. El sapo Fred salta verticalmente desde un árbol hacia una patineta que se mueve horizontalmente. La patineta frena. Discute dos razones para esto: una en términos de una fuerza de fricción horizontal entre los pies de Freddy y la patineta, y una en términos de conservación de cantidad de movimiento.

99. Tú tienes un amigo que dice que, después de que una bola de golf choca con una bola de boliche en reposo, aunque la rapidez adquirida por la bola de boliche es muy pequeña, su cantidad de movimiento supera la cantidad de movimiento inicial de la bola de golf. Más aún, tu amigo afirma que esto se relaciona con la cantidad de movimiento "negativa" de la bola de golf después de la colisión. Otro amigo dice que estas son tonterías, que se violaría la conservación de la cantidad de movimiento. ¿Con cuál de tus amigos estás de acuerdo?
100. Supón que hay tres astronautas afuera de una nave espacial y que deciden jugar atrapadas. Todos los astronautas pesan lo mismo sobre la Tierra y son igualmente fuertes. El primer astronauta lanza al segundo hacia el tercero y comienza el juego. Describe el movimiento de los astronautas conforme avanza el juego. ¿Cuánto durará el juego?



101. La luz posee cantidad de movimiento. Esto puede demostrarse con un radiómetro, que se muestra en el dibujo. Paletas metálicas pintadas de negro en un lado y de blanco en el otro tienen libertad para girar en torno a la punta de una aguja montada en un vacío. Cuando la luz incide sobre la superficie negra, se absorbe; cuando la luz incide sobre la superficie blanca, se refleja. ¿Sobre cuál superficie el impulso de la luz incidente es mayor y en qué sentido girarán las paletas? (Giran en dirección opuesta en los radiómetros más comunes en los que hay aire presente en la cámara de vidrio; tu instructor podrá decirte por qué.)



102. Un deuterón es una partícula nuclear constituida por un protón y un neutrón. Supón que un deuterón acelera hasta cierta rapidez en un ciclotrón y se dirige hacia una cámara de observación, donde choca y se queda pegado a una partícula blanco que inicialmente está en reposo y luego se observa que la combinación se mueve exactamente a la mitad de la rapidez del deuterón incidente. Discute por qué los observadores afirman que la partícula blanco es ella misma un deuterón.
103. Una bola de billar se detendrá poco después cuando choque de frente con una bola en reposo. Sin embargo, la bola no se detendrá poco después si la colisión no es exactamente frontal; esto es: si la segunda bola se mueve a un ángulo respecto de la trayectoria de la primera. ¿Tú sabes por qué? (*Sugerencia:* considera las cantidades de movimiento antes y después de la colisión a lo largo de la dirección inicial de la primera bola y también en una dirección perpendicular a esta dirección inicial.)
104. Cuando un núcleo de uranio estacionario experimenta fisión, se descompone en dos trozos desiguales que se apartan. ¿Qué puedes concluir acerca de las cantidades de movimiento de los trozos? Discute lo que concluyas acerca de las rapideces relativas de los trozos.

# 7

## CAPÍTULO 7

# Energía


7.1 Trabajo
7.2 Energía potencial
7.3 Energía cinética
7.4 Teorema trabajo-energía
7.5 Conservación de la energía
7.6 Máquinas
7.7 Eficiencia
7.8 Fuentes de energía

**1** Un carrito fabricado por los alumnos e impulsado por una ratonera se suma a la exposición que Christine Lindström realiza acerca de los conceptos de energía. **2** Neil deGrasse Tyson lamenta que, si nos visitaran extraterrestres, se avergonzaría de decirles que todavía excavamos combustibles fósiles del subsuelo como fuente de energía. **3** Christine y David Vernier muestran de un modo gracioso el movimiento de un carro sobre una pista. **4** Esta planta fotovoltaica en la base Nellis de la fuerza aérea, en Nevada, es líder en la obtención de energía solar limpia en Estados Unidos.

Uno de los científicos más importantes de Francia fue Émilie du Châtelet, quien vivió en el siglo XVIII, cuando toda Europa celebraba los logros de Isaac Newton. Ella no sólo destacó en ciencia, sino también en filosofía e incluso en estudios bíblicos. Fue la primera en traducir al francés los *Principia* de Newton y anotó su traducción con nuevos resultados en mecánica.

De los muchos amantes de du Châtelet, Voltaire fue el más famoso. Vivieron juntos durante 15 años, reunieron una biblioteca de más de 20,000 volúmenes y cada uno estimuló y criticó el trabajo del otro. La suya fue una de las más emocionantes y apasionadas historias de amor europeas.

En la época había un gran debate en física sobre la naturaleza del "empuje" que tenían los objetos en movimiento. Los científicos en Inglaterra afirmaban que el empuje (lo que ahora se denomina energía cinética) era masa × velocidad, en tanto que científicos como Gottfried Leibniz en Alemania afirmaban que era masa × velocidad al cuadrado. Al final, el debate se aclaró con las observaciones y un artículo publicado por du Châtelet que citaba un experimento sencillo de otro científico para distinguir entre las dos hipótesis. Cuando una pequeña esfera sólida de latón se soltaba en arcilla, dejaba una abolladura. Si la bola golpeaba con el doble de rapidez, y si su empuje era masa × velocidad, entonces la abolladura en la arcilla debía tener el doble de profundidad. Pero el experimento demostró que la abolladura era cuatro veces más profunda (2 al cuadrado). Soltar la bola desde un punto más elevado, de modo que golpeara la arcilla con tres veces la rapidez, producía una abolladura que no era tres veces más profunda, sino nueve veces más profunda (3 al cuadrado). Dado que Émilie du Châtelet era tan respetada por la comunidad científica, ella terminó la controversia al apoyar el argumento de que el empuje de las cosas en movimiento era proporcional a masa × velocidad al cuadrado.

Émilie se embarazó a los 42 años de edad, lo cual era peligroso en la época. En esa época los médicos no sabían que debían lavarse las manos o esterilizar sus instrumentos. No había antibióticos para controlar las infecciones, que eran frecuentes. Ella murió una semana después del parto. Voltaire estaba fuera de sí: "perdí la mitad de mí mismo, un alma para la cual estaba hecha la mía". La mayor parte de las extensas publicaciones de Voltaire se produjeron antes de la muerte de Émilie, y después fueron relativamente pocas. Se dice que siguió llorando por ella hasta su vejez.

Como aprendiste en el Capítulo 6, el producto de masa y velocidad es lo que se llama *cantidad de movimiento.* En este capítulo verás que el producto de masa y velocidad al cuadrado (junto con un factor de ½) es lo que se llama *energía cinética.* Ahora conocerás las formas de energía, incluida la energía cinética. Comienza por considerar un concepto relacionado: trabajo.

La palabra *trabajo,* en el uso común, significa ejercicio físico o mental. No confundas la definición física de *trabajo* con la noción cotidiana de trabajo. El trabajo es una transferencia de energía.

## 7.1 Trabajo

En el Capítulo 6 se vio que los cambios en el movimiento de un objeto dependen tanto de la fuerza como de durante cuánto actúa la fuerza. En ese caso, "durante cuánto" significa tiempo, y a la cantidad (fuerza × tiempo) se le denomina *impulso.* Pero "durante cuánto" no siempre significa tiempo; también puede significar distancia. Cuando se considera la cantidad (fuerza × *distancia*) se habla de un concepto completamente diferente: *trabajo.* El **trabajo** es el esfuerzo ejercido sobre algo que cambiará su energía.

Cuando levantas una carga de grava contra la gravedad de la Tierra, realizas trabajo. Cuanto más pesada sea la carga o más alto eleves la carga, más trabajo realizas. Dos cosas entran en escena siempre que se realiza trabajo: 1) la aplicación de una fuerza y 2) el movimiento de algo debido a dicha fuerza. Para el caso más simple, donde la fuerza es constante y el movimiento es en línea recta en la dirección de la fuerza,[1] el trabajo realizado sobre un objeto por una fuerza aplicada se define como el producto de la fuerza y la distancia a lo largo de la cual se mueve el objeto.

[1]Por lo general, el trabajo es el producto sólo del componente de fuerza que actúa en la dirección del movimiento y la distancia que se movió el objeto. Por ejemplo, si una fuerza actúa en un ángulo con el movimiento, el componente de fuerza paralela al movimiento se multiplica por la distancia movida. Cuando una fuerza actúa en ángulos rectos con respecto a la dirección de movimiento, sin componente de fuerza en la dirección de movimiento, ésta no realiza trabajo. Un ejemplo común es un satélite en una órbita circular; la fuerza de gravedad está en ángulo recto con su trayectoria circular y no se realiza trabajo sobre el satélite. Por tanto, éste orbita sin cambio en rapidez.

**FIGURA 7.1**
Si se compara con el trabajo realizado para levantar una carga de grava un piso, se ejecuta el doble de trabajo si se levanta la misma carga dos pisos. Se realiza el doble de trabajo porque la distancia es del doble.

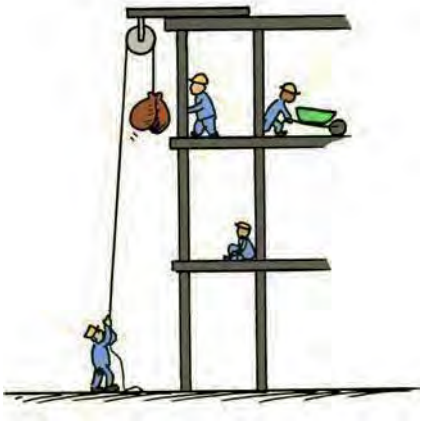


**FIGURA 7.2**
Cuando el doble de carga se levanta hasta la misma altura, se realiza el doble de trabajo porque la fuerza necesaria para levantarla es del doble.

En resumen:

$$\text{Trabajo} = \text{fuerza} \times \text{distancia}$$
$$W = Fd$$

Si levantas dos cargas de grava un piso, haces el doble de trabajo que si levantaras una carga la misma distancia, porque la *fuerza* necesaria para levantar el doble de peso es del doble. De igual modo, si levantas una carga dos pisos en lugar de un piso, duplicas el trabajo porque la *distancia* es del doble.

Se observa que la definición de trabajo tiene que ver tanto con una fuerza como con una distancia. Una levantadora de pesas que sostiene sobre su cabeza una barra que pesa 1,000 newtons no realiza trabajo sobre la barra. Se puede cansar mucho de sostener la barra pero, si no la mueve por la fuerza que ejerce, no realiza ningún trabajo *sobre la barra.* Puede realizarse trabajo sobre los músculos por estiramiento y contracción, que es fuerza por distancia a una escala biológica, pero este trabajo no se realiza sobre la barra. Más bien, la energía empleada calienta sus brazos. Sin embargo, levantar la barra es otra historia. Cuando la levantadora de pesas eleva la barra desde el suelo, realiza trabajo sobre la barra.

Por lo general, el trabajo se clasifica en dos categorías. Una de ellas es el trabajo ejecutado contra otra fuerza. Cuando un arquero tensa la cuerda de su arco, realiza trabajo contra las fuerzas elásticas del arco. De igual modo, cuando el pistón de un martinete se eleva, se necesita trabajo para elevar el pistón contra la fuerza de gravedad. Cuando haces lagartijas, realizas trabajo contra tu propio peso. Realizas trabajo sobre algo cuando lo obligas a moverse contra la influencia de una fuerza opuesta, con frecuencia la fricción.

La otra categoría de trabajo es el que se efectúa para cambiar la rapidez de un objeto. Este tipo de trabajo se realiza cuando se lleva un automóvil a adquirir rapidez o cuando se frena. Otro ejemplo de este tipo de trabajo es cuando un *club* golpea una bola de golf estacionaria y la pone en movimiento. En ambas categorías (trabajo contra una fuerza o para cambiar rapidez), el trabajo involucra una transferencia de energía.

La unidad de medida para el trabajo combina una unidad de fuerza (N) con una unidad de distancia (m); la unidad de trabajo es el newton-metro (N·m), también llamado *joule* (J), que rima con *cool.* Un joule de trabajo se realiza cuando una fuerza de 1 N se ejerce a lo largo de una distancia de 1 metro, como cuando levantas una pelota de béisbol sobre tu cabeza. Para valores más grandes, se habla de kilojoules (kJ, miles de joules) o megajoules (MJ, millones de joules). La levantadora de pesas de la Figura 7.3 realiza trabajo en kilojoules. Detener un camión cargado en su camino cuando se mueve a 100 km/h exige megajoules de trabajo.

**FIGURA 7.3**
Al levantar la barra se realiza trabajo.

**FIGURA 7.4**
Aunque gaste energía cuando empuja la pared, si la pared no se mueve, no se realiza ningún trabajo sobre la pared.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Cuánto trabajo se necesita para levantar una bolsa de abarrotes que pesa 200 N a una altura de 3 m?**
2. **¿Cuánto trabajo se necesita para levantarla el doble de alto?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. $W = Fd$ = 200 N × 3 m = 600 J.
2. Levantar la bolsa el doble de alto exige el doble de trabajo (200 N × 6 m = 1,200 J).

## Potencia

La definición de trabajo no dice nada sobre cuánto tarda en realizarse el trabajo. Realizas la misma cantidad de trabajo cuando transportas una bolsa de abarrotes en un tramo de escaleras, ya sea que camines o que corras. Pero, ¿por qué estás más cansado después de subir corriendo las escaleras en pocos segundos, que después de subirlas caminando en algunos minutos? Para comprender esta diferencia, es necesario hablar de una medida que indique qué tan rápido se realiza el trabajo: la *potencia*. La **potencia** es la cantidad de trabajo realizado por el tiempo que toma realizarlo:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{trabajo realizado}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

Un motor de gran potencia realiza trabajo rápidamente. El motor de un automóvil que suministra el doble de potencia que otro motor de automóvil no necesariamente produce el doble de trabajo o hace que el automóvil vaya el doble de rápido que el motor menos potente. El doble de potencia significa que el motor puede realizar el doble de trabajo en el mismo tiempo o realizar la misma cantidad de trabajo en la mitad de tiempo. Un motor con más potencia puede hacer que un automóvil adquiera una rapidez dada en menos tiempo que un motor con menos potencia.

He aquí otra forma de ver la potencia: un litro (L) de combustible puede hacer cierta cantidad de trabajo, pero la potencia producida cuando lo quemas puede ser cualquier cantidad, que dependerá de qué tan *rápido* se queme. Puede operar una podadora de césped durante media hora o un motor jet durante medio segundo.

La unidad de potencia es el joule por segundo (J/s), también conocida como watt (en honor de James Watt, el creador de la máquina de vapor en el siglo XVIII). Un watt (W) de potencia se gasta cuando 1 joule de trabajo se realiza en 1 segundo. Un kilowatt (kW) es igual a 1,000 watts. Un megawatt (MW) es igual a 1 millón de watts. En Estados Unidos, los motores suelen clasificarse en unidades de caballos de fuerza y la electricidad en kilowatts, pero puede usarse cualquiera de ellas. En el sistema métrico de unidades, los automóviles se clasifican en kilowatts. (Un caballo de fuerza equivale a 746 watts, de modo que un motor clasificado en 134 caballos de fuerza es un motor de 100 kW.)

**pti**

- Tu corazón usa un poco más de 1 W de potencia para bombear la sangre por tu cuerpo.

**FIGURA 7.5**
El cohete Atlas V541 que lanzó al *Curiosity* a Marte en 2011 ilustra conceptos como empuje (fuerza), trabajo (fuerza × distancia), energía (consumo de combustible) y potencia (la tasa a la que se gasta la energía).

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Si un nuevo modelo de carretilla elevadora tiene el doble de potencia que un modelo antiguo, ¿cuánta más carga puede levantar en la misma cantidad de tiempo? Si levanta la misma carga que la antigua, ¿cuánto más rápido puede funcionar?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La carretilla elevadora nueva suministra el doble de potencia, de modo que puede levantar el doble de carga en el mismo tiempo o la misma carga en la mitad del tiempo. De cualquier forma, el dueño de la nueva carretilla elevadora está feliz.

## Energía mecánica

Cuando un arquero realiza trabajo para tensar la cuerda de su arco, el arco doblado adquiere la capacidad de realizar trabajo sobre la flecha. Cuando se realiza trabajo para elevar el pesado pistón de un martinete, el pistón adquiere la capacidad de realizar trabajo sobre el objeto que golpea cuando cae. Cuando se realiza trabajo para devanar un mecanismo de resorte, el resorte adquiere la capacidad para realizar trabajo sobre varios engranes para operar un reloj, timbrar una campana o sonar una alarma.

En cada caso, algo se adquiere que permite al objeto realizar trabajo. Puede ser en la forma de una compresión de átomos en el material de un objeto, una separación física de cuerpos que se atraen o un reordenamiento de cargas eléctricas en las moléculas de una sustancia. Este "algo" que permite a un objeto realizar trabajo es la **energía**.[2] Al igual que el trabajo, la energía se mide en joules. Aparece en muchas formas que se abordarán en capítulos posteriores. Por ahora, la atención se centrará en las dos formas más comunes de **energía mecánica**: la energía debida a la posición de algo y la debida al movimiento de algo. La energía mecánica puede estar en la forma de energía potencial, energía cinética o la suma de las dos.

**pti**

- El concepto de energía era desconocido para Isaac Newton, y su existencia todavía era motivo de debate en la década de 1850. Aunque familiar, la energía es difícil de definir porque es tanto una "cosa" como un proceso, similar tanto a un sustantivo como a un verbo. La energía se percibe en las cosas sólo cuando se transfiere o se transforma.

## 7.2 Energía potencial

Un objeto puede almacenar energía en virtud de su posición. La energía que se almacena y se mantiene disponible se denomina **energía potencial** (EP) porque en el estado almacenado tiene el potencial de realizar trabajo. Un resorte estirado o comprimido, por ejemplo, tiene el potencial de realizar trabajo. Cuando un arco se tensa, se almacena energía en el arco. El arco puede realizar trabajo sobre la flecha. Una banda de caucho estirada tiene energía potencial debido a la posición relativa de sus partes. Si la banda de caucho es parte de un tirachinas, es capaz de realizar trabajo.

**SCREENCAST: Trabajo y energía potencial**

La energía química de los combustibles también es energía potencial. En realidad es energía de posición a nivel submicroscópico. Esta energía queda disponible cuando las posiciones de las cargas eléctricas dentro y entre moléculas se altera; esto es: cuando ocurre una reacción química. Cualquier sustancia que pueda hacer trabajo mediante acción química tiene energía potencial. La energía potencial se encuentra en los combustibles fósiles, baterías eléctricas y los alimentos que consumes.

Para elevar los objetos contra la gravedad de la Tierra se necesita trabajo. La energía potencial debida a posiciones elevadas se llama *energía potencial gravitacional*. El agua en un depósito elevado y el pistón elevado de un martinete tienen ambos energía potencial gravitacional. Siempre que se realiza trabajo, se intercambia energía.

La cantidad de energía potencial gravitacional que tiene un objeto elevado es igual al trabajo realizado contra la gravedad para elevarlo. El trabajo realizado es igual a la fuerza necesaria para moverlo hacia arriba por la distancia vertical que se mueve (recuerda $W = Fd$). La fuerza ascendente que se necesita mientras se mueve con velocidad constante es igual al peso, $mg$, del objeto, de modo que el trabajo realizado para levantarlo hasta una altura $h$ es el producto $mgh$:

$$\text{Energía potencial gravitacional} = \text{peso} \times \text{altura}$$
$$\text{EP} = mgh$$

Observa que la altura es la distancia por arriba de determinado nivel de referencia elegido, como el suelo o el piso de un edificio. La energía potencial gravitacional, $mgh$, es relativa a dicho nivel y sólo depende de $mg$ y de $h$. En la Figura 7.6 puedes ver que la energía potencial de la bola elevada no depende de la trayectoria que se sigue para alcanzar dicho nivel.

[2]Estrictamente hablando, lo que permite a un objeto realizar trabajo es su *energía disponible* pues no toda la energía en un objeto puede transformarse en trabajo.

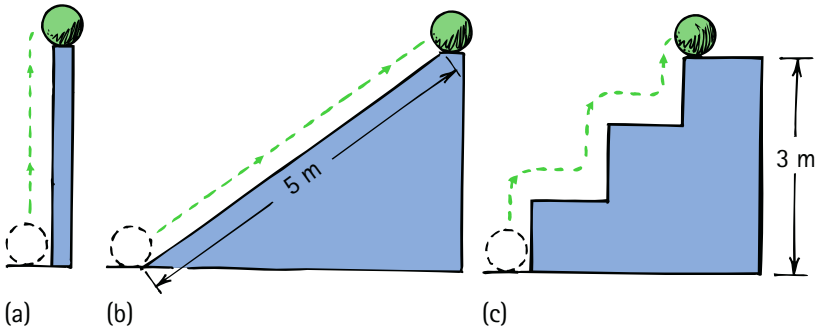



**FIGURA 7.6**
La energía potencial de la bola de 10 N es la misma (30 J) en los tres casos, porque el trabajo realizado para elevarla 3 m es el mismo ya sea que (a) se eleve con 10 N de fuerza, (b) se empuje con 6 N de fuerza en dirección ascendente del plano inclinado de 5 m o (c) se eleve con 10 N cada peldaño de 1 m. Cuando se mueve la bola horizontalmente no se realiza trabajo (si se ignora la fricción).

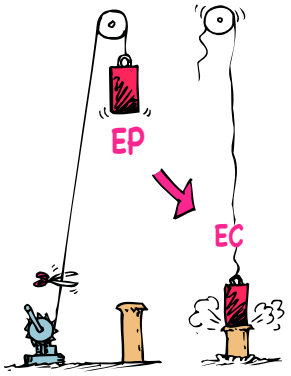



**FIGURA 7.7**
La energía potencial del pistón elevado del martinete se convierte en energía cinética cuando se libera.

La energía potencial, gravitacional o de otro tipo, sólo tiene significado cuando *cambia*: cuando realiza trabajo o se transforma en energía de alguna otra forma. Por ejemplo, si la bola de la Figura 7.6 cae desde su posición elevada y realiza 30 joules de trabajo cuando aterriza, entonces pierde 30 joules de energía potencial. La energía potencial de la bola o cualquier objeto guarda relación con un determinado nivel de referencia. Sólo los *cambios* de energía potencial son significativos. Uno de los tipos de energía en los que puede cambiar la energía potencial es la energía de movimiento o *energía cinética*.

**FIGURA 7.8**
Ambos realizan el mismo trabajo para elevar el bloque.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Cuánto trabajo se realiza para levantar el bloque de hielo de 100 N una distancia vertical de 2 m, como se muestra en la Figura 7.8?**
2. **¿Cuánto trabajo se realiza para empujar el mismo bloque de hielo hacia arriba de la rampa de 4 m de largo? (La fuerza necesaria sólo es de 50 N, que es la razón por la que se utilizan rampas.)**
3. **¿Cuál es el aumento de energía potencial gravitacional del bloque en cada caso?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. $W = Fd = 100\ \text{N} \times 2\ \text{m} = 200\ \text{J}$.
2. $W = Fd = 50\ \text{N} \times 4\ \text{m} = 200\ \text{J}$.
3. En ambos casos la energía potencial del bloque aumenta en 200 J. La rampa simplemente hace que este trabajo sea más fácil de realizar.

## 7.3 Energía cinética

Si empujas un objeto, puedes ponerlo en movimiento. Si un objeto está en movimiento, entonces es capaz de realizar trabajo. Tiene energía de movimiento. Se dice que tiene **energía cinética** (EC). La energía cinética de un objeto depende tanto de la masa del objeto como de su rapidez. Es igual a la masa multiplicada por el cuadrado de la rapidez, multiplicada por la constante ½:

$$\text{Energía cinética} = \frac{1}{2}\ \text{masa} \times \text{rapidez}^2$$

$$\text{EC} = \frac{1}{2}mv^2$$

**SCREENCAST: Energías potencial y cinética**

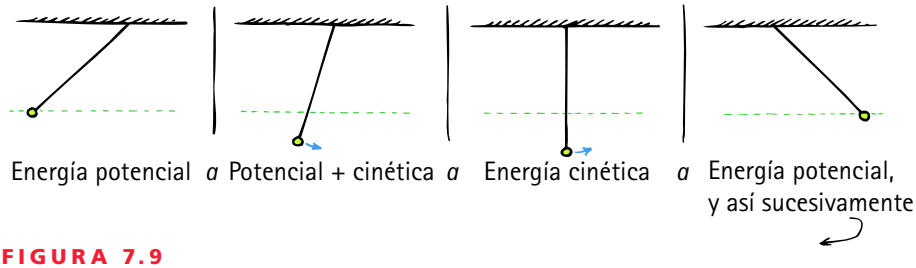



**FIGURA 7.9**
Transiciones de energía en un péndulo. La EP es en relación con el punto más bajo del péndulo, cuando es vertical.

Cuando lanzas una bola, haces trabajo sobre ella para darle rapidez al tiempo que abandona tu mano. Entonces, la bola en movimiento puede golpear algo y empujarlo, con lo que realiza trabajo sobre lo que golpea. La energía cinética de un objeto en movimiento es igual al trabajo necesario para llevarlo desde el reposo hasta su rapidez, o al trabajo que el objeto puede realizar mientras se lleva al reposo:

$$\text{Fuerza neta} \times \text{distancia} = \text{energía cinética}$$

o, en notación simbólica,

$$Fd = \frac{1}{2}mv^2$$

Observa que la rapidez es al cuadrado, de modo que si la rapidez de un objeto se duplica, su energía cinética se cuadruplica ($2^2 = 4$). En consecuencia, se necesita 4 veces más trabajo para duplicar la rapidez. Siempre que se realiza trabajo, cambia la energía.

**FIGURA 7.10**
La energía potencial del arco tenso de Tenny es igual al trabajo (fuerza promedio × distancia) que realizó para poner la flecha en posición. Cuando la flecha se suelte, la mayor parte de la energía potencial del arco tenso se convertirá en energía cinética de la flecha.

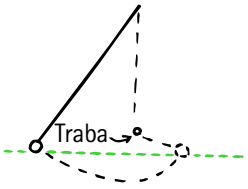



**FIGURA 7.11**
El péndulo se balanceará hasta su altura original ya sea que esté o no presente la traba.

**FIGURA 7.12**
La "caída" cuesta abajo de la montaña rusa resulta en una rapidez tremenda durante la bajada, y esta energía cinética la envía de vuelta arriba de la pista inclinada hacia la siguiente cima.

**VIDEO: Bola de boliche y la conservación de la energía**

## 7.4 Teorema trabajo-energía

Cuando un automóvil incrementa su rapidez, su ganancia en energía cinética proviene del trabajo realizado sobre él. O cuando un automóvil en movimiento frena, se realiza trabajo para reducir su energía cinética. Se puede decir:[3]

$$\text{Trabajo} = \Delta\text{EC}$$

Trabajo es igual a *cambio* en energía cinética. Éste es el **teorema trabajo-energía**. El trabajo en esta ecuación es el trabajo *neto*; esto es: el trabajo con base en la fuerza

La energía es la forma como la naturaleza lleva las cuentas. ¡Los embaucadores que venden máquinas fabricadoras de energía se aprovechan del financiamiento proveniente de carteras abultadas y cerebros huecos!

[3]Esta ecuación puede derivarse del siguiente modo: si ambos lados de $F = ma$ (segunda ley de Newton) se multiplican por $d$, se obtiene $Fd = mad$. Recuerda del Capítulo 3 que, para aceleración constante desde el reposo, $d = \frac{1}{2}at^2$, de modo que es posible decir que $Fd = ma(\frac{1}{2}at^2) = (\frac{1}{2})maat^2$, y al sustituir $v = at$, se obtiene $Fd = \frac{1}{2}mv^2$. Esto es: Trabajo = EC ganada.

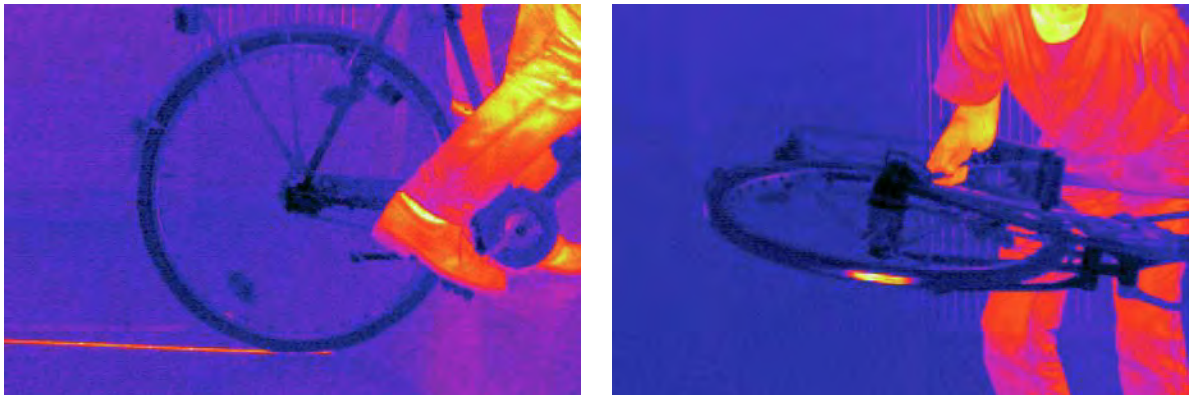


**FIGURA 7.13**
Debido a la fricción, se transfiere energía tanto al piso como a la llanta cuando la bicicleta derrapa hasta detenerse. Una cámara infrarroja revela el rastro de la llanta calentada (la banda roja sobre el piso, izquierda) y el calentamiento de la llanta (derecha). (Cortesía de Michael Vollmer.)

neta. Si, por ejemplo, empujas un objeto y la fricción también actúa sobre el objeto, el cambio de energía cinética es igual al trabajo realizado por la fuerza neta, que es tu empuje menos la fricción. En este caso, sólo parte del trabajo total que realizas cambia la energía cinética del objeto. El resto, la fricción lo transforma en energía térmica. Si la fuerza de fricción es igual y opuesta a tu empuje, la fuerza neta sobre el objeto es cero y no se realiza trabajo neto. Entonces no hay cambio en la energía cinética del objeto. El teorema trabajo-energía también se aplica para rapidez decreciente. Cuando pisas los frenos de un automóvil y éste derrapa, el camino realiza trabajo sobre el automóvil. Este trabajo es la fuerza de fricción multiplicada por la distancia sobre la cual actúa la fuerza de fricción.

Es interesante saber que la fricción máxima que el camino puede suministrar a una llanta que derrapa es casi la misma ya sea que el automóvil se mueva en forma lenta o rápida. Un automóvil que se mueve al doble de rapidez que otro automóvil necesita cuatro veces ($2^2 = 4$) más trabajo para detenerse. Dado que la fuerza de fricción es casi la misma para ambos vehículos, el más rápido derrapa cuatro veces más lejos antes de detenerse. De modo que, como saben bien los investigadores de accidentes, un automóvil que va a 100 km/h tiene cuatro veces la energía cinética que tendría a 50 km/h, y el vehículo derrapa cuatro veces más lejos con sus llantas bloqueadas de lo que derraparía con una rapidez de 50 km/h. La energía cinética depende de la rapidez *al cuadrado.* El mismo razonamiento se aplica a los frenos antibloqueo (que evitan que las llantas se derrapen para mantener el agarre del camino sobre las llantas). Para la llanta que no derrapa, la máxima fricción del camino también es casi independiente de la rapidez, de modo que incluso con frenos antibloqueo, se necesita cuatro veces la distancia de frenado al doble de rapidez.

Cuando un automóvil frena y las llantas no derrapan, los tambores convierten la energía cinética en energía térmica. Si las llantas derrapan, las huellas de las llantas y el camino se calientan, no los frenos. Algunos conductores están familiarizados con otra forma de frenar un vehículo: cambiar a una velocidad baja y permitir que el motor realice el frenado. Los automóviles híbridos de hoy en día hacen algo similar; usan un generador eléctrico para convertir la energía cinética del automóvil que frena en energía eléctrica que puede almacenarse en baterías, donde se usa para complementar la energía producida por la combustión de gasolina. (En el Capítulo 25 se describe cómo se hace esto.)

El teorema trabajo-energía puede aplicarse a algo más que los cambios en energía cinética. Cuando una fuerza externa realiza trabajo, puede decirse que trabajo $= \Delta E$, donde $E$ representa todos los tipos de energía. El trabajo no es una forma de energía, sino una forma de transferir energía de un lugar a otro o de una forma a otra.[4]

La energía cinética y la energía potencial son dos entre muchas formas de energía, y son la base de otras formas de energía, como la energía química, la energía nuclear y la energía transportada por el sonido y la luz. La energía cinética del movimiento molecular aleatorio se relaciona con la temperatura; las energías potenciales de las cargas eléctricas

**SCREENCAST: Teorema trabajo-energía**

[4]La primera ley de la termodinámica, escrita $\Delta E = W + Q$, establece que el cambio de energía de un sistema es el trabajo realizado sobre él más la cantidad de calor transferida hacia él.

explican el voltaje, y las energías cinética y potencial del aire en vibración definen la intensidad sonora. Incluso la energía luminosa se origina del movimiento de los electrones dentro de los átomos. Toda forma de energía puede transformarse en cualquier otra forma.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Si conduces a 90 km/h, ¿cuánta distancia adicional necesitarías para detenerte que si condujeras a 30 km/h?**
2. **¿Un objeto puede tener energía?**
3. **¿Un objeto puede tener trabajo?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Nueve veces más. El automóvil tiene 9 veces más energía cinética cuando viaja 3 veces más rápido: $\frac{1}{2}m(3v)^2 = \frac{1}{2}m9v^2 = 9\left(\frac{1}{2}mv^2\right)$. La fuerza de fricción generalmente será la misma en cualquier caso; por tanto, 9 veces más trabajo requiere 9 veces más distancia.
2. Sí, pero en un sentido relativo. Por ejemplo, un objeto elevado puede tener EP en relación con el suelo, pero no energía en relación con un punto a la misma altura. De igual manera, la EC que tiene un objeto guarda relación con un marco de referencia, por lo general la superficie de la Tierra. (Verás que los objetos materiales tienen *energía de ser*, $E = mc^2$, la energía coagulada que constituye sus masas. ¡Sigue leyendo!)
3. No. A diferencia de la cantidad de movimiento o la energía, el trabajo no es algo que un objeto *tenga*. El trabajo es *energía en tránsito*. Es la energía transferida cuando una fuerza actúa sobre un objeto a medida que éste se mueve a lo largo de una distancia.

## 7.5 Conservación de la energía

Más importante que saber *qué es la energía* es comprender cómo se comporta: *cómo se transforma*. Es posible comprender mejor los procesos y cambios que ocurren en la naturaleza si los analizas en términos de *cambios* de energía —transformaciones de una forma en otra— o de transferencias de una ubicación a otra. La energía es la forma como la naturaleza lleva las cuentas.

Considera los cambios de energía en la operación del martinete de la Figura 7.7. Se realiza trabajo para elevar el pistón, lo que le da energía potencial, que se convierte en energía cinética cuando el pistón se suelta. Esta energía se transfiere al pilote bajo él. Lo ideal es que la distancia que el pilote penetra en el suelo multiplicada por la fuerza de impacto promedio, que es el trabajo realizado sobre el pilote, sea igual a la energía potencial inicial del pistón. Si se tiene en cuenta toda la energía térmica y sonora, se descubre que la energía se transforma sin pérdida o ganancia neta. ¡Extraordinario!

El estudio de varias formas de energía y sus transformaciones de una forma a otra condujo a una de las más grandes generalizaciones de la física: la **ley de conservación de la energía**:

> **La energía no se puede crear ni destruir; puede transformarse de una forma a otra, pero la cantidad total de energía nunca cambia.**

Cuando se considera cualquier sistema en su totalidad, ya sea tan sencillo como un péndulo que se balancea o tan complejo como una supernova que explota, hay una cantidad que no se crea ni se destruye: la energía. La energía puede cambiar de forma o simplemente transferirse de un lugar a otro, pero, como aprendieron los científicos, la cantidad total de energía permanece igual. Esta cantidad de energía toma en cuenta

Los inventores tienen cuidado: cuando introducen una idea nueva, primero se aseguran de que esté dentro del contexto de lo que se sabe en la actualidad. Por ejemplo, cualquier idea nueva debe ser congruente con la conservación de la energía.

**SCREENCAST: Conservación de la energía**

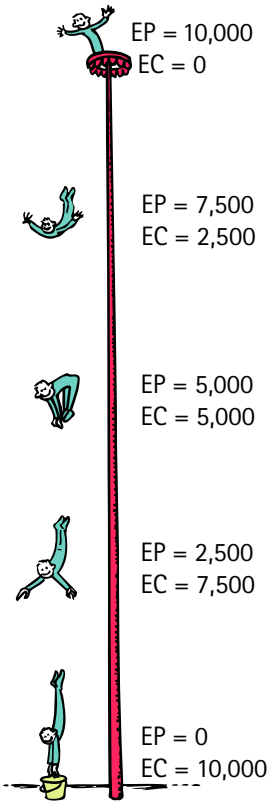



**FIGURA 7.15**
Un buzo de circo en lo alto de un poste tiene una EP de 10,000 J. Cuando salta, su EP se convierte en EC. Observa que, en posiciones sucesivas de un cuarto, un medio, tres cuartos y cuando está abajo, la energía total es constante.

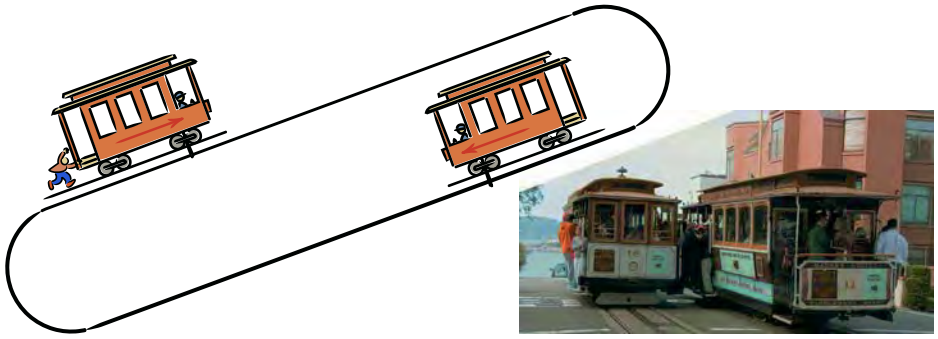


**FIGURA 7.14**
Los tranvías sobre las inclinadas colinas de San Francisco se transfieren energía entre sí de un modo muy eficaz mediante el cable que está bajo la calle. El cable forma un bucle completo que conecta los tranvías que marchan tanto colina arriba como colina abajo. De esta manera, el carro que baja por la colina realiza trabajo sobre un carro que sube por la colina. Por lo tanto, el incremento de la EP gravitacional de un carro que asciende por la colina se debe a la disminución de la EP gravitacional de un carro que desciende por la colina.

el hecho de que los átomos que constituyen la materia son ellos mismos paquetes concentrados de energía. Cuando los núcleos de los átomos se reordenan, pueden liberarse enormes cantidades de energía. El Sol brilla porque parte de su energía nuclear se transforma en energía radiante.

La enorme compresión debida a la gravedad y a las temperaturas extremadamente altas en el interior profundo del Sol funden y unen núcleos de átomos de hidrógeno para formar núcleos de helio. Esto es *fusión termonuclear*, un proceso que libera energía radiante, una pequeña parte de la cual llega a la Tierra. Parte de la energía que llega a la Tierra cae sobre las plantas (y sobre otros organismos fotosintéticos) y parte de ésta, a su vez, se almacena después en forma de carbón. Otra parte sostiene la vida en la cadena alimenticia que comienza con las plantas (y otros fotosintetizadores) y parte de esta energía se almacena después en el petróleo. Parte de la energía del Sol entra en la evaporación del agua del océano, y parte de ésta regresa a la Tierra en forma de lluvia que puede atraparse detrás de una presa. En virtud de su posición elevada, el agua detrás de una presa tiene energía que puede utilizarse para impulsar una planta generadora abajo, donde se transformará en energía eléctrica. La energía viaja por cables a las casas, donde sirve para iluminar, calentar, cocinar y operar dispositivos eléctricos. ¡Qué maravilla que la energía se transforme de una forma a otra!

## ENERGÍA Y TECNOLOGÍA

Trata de imaginar la vida antes de que los seres humanos controlaran la energía. Imagina la vida doméstica sin luz eléctrica, refrigeradores, sistemas de calefacción y enfriamiento, teléfono ni los dispositivos electrónicos que utilizamos, por no mencionar el automóvil familiar. Se puede pensar de un modo romántico que la vida sería mejor sin ellos, pero sólo si no tienes en cuenta las horas de trabajo diario dedicadas a lavar la ropa, cocinar y calentar las casas. También habría que ignorar lo difícil que era conseguir un médico en momentos de emergencia antes de la llegada del teléfono, cuando un médico tenía en su maletín poco más que laxantes, aspirinas y píldoras de azúcar, y cuando las tasas de mortalidad infantil eran asombrosas.

La sociedad se ha acostumbrado tanto a los beneficios de la tecnología que sólo está vagamente consciente de su dependencia de las presas, las plantas eléctricas, la transportación masiva, la electrificación, la medicina moderna y la ciencia agrícola moderna para su mera existencia. Cuando disfrutas una comida sabrosa, piensas poco en la tecnología que se utilizó para cultivar, cosechar y llevar el alimento a la mesa. Cuando se enciende una luz, se piensa poco en la red eléctrica de control central que enlaza las líneas de transmisión de larga distancia o en las estaciones eléctricas dispersas. Donde dichas líneas actúan como arterias productivas de la industria, el transporte y la electrificación de la sociedad. Quienquiera que piense que la ciencia y la tecnología son "inhumanas" es porque no ha logrado comprender las maneras en las que hacen que la vida sea más humana.

## FÍSICA EN EL CIRCO

El acróbata Art, con masa $m$, está de pie en el extremo izquierdo de un subibaja. El acróbata Bart, con masa $M$, salta desde una altura $h$ sobre el extremo derecho del subibaja y, por tanto, impulsa a Art hacia el aire.

(a) Si desprecias ineficiencias, ¿cuál es la diferencia entre la EP de Art en la parte superior de su trayectoria y la EP de Bart justo antes de saltar?

(b) Demuestra que, idealmente, Art alcanza una altura $\frac{M}{m}h$.

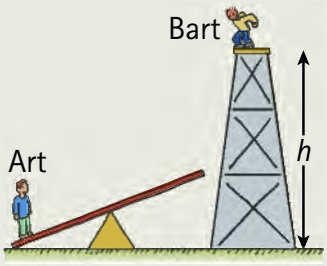
(c) Si la masa de Art es 40 kg, la masa de Bart es 70 kg y la altura del salto inicial era 4 m, demuestra que Art se eleva una distancia vertical de 7 m.

### SOLUCIÓN

(a) Si desprecias ineficiencias, toda la EP inicial de Bart antes de caer se convierte en la EP de Art al elevarse hasta su cima; esto es: en el momento en que la EC de Art es igual a cero.

(b)
$$\begin{aligned} \mathrm{EP}_{\mathrm{Bart}} &= \mathrm{EP}_{\mathrm{Art}} \\ Mgh_{\mathrm{Bart}} &= mgh_{\mathrm{Art}} \\ h_{\mathrm{Art}} &= \frac{M}{m}h. \end{aligned}$$

(c) $$h_{\mathrm{Art}} \frac{M}{m}h = \left(\frac{70\ \mathrm{kg}}{40\ \mathrm{kg}}\right) 4\ \mathrm{m} = 7\ \mathrm{m}$$

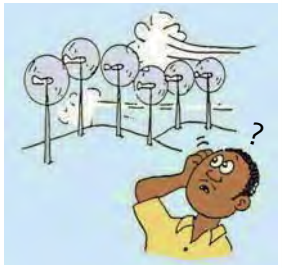



### PUNTO DE CONTROL

1. **¿Un automóvil consume más combustible cuando su aire acondicionado se enciende? ¿Cuando sus luces se encienden? ¿Cuando su radio se enciende mientras el motor se apaga en un estacionamiento?**
2. **¿La energía eléctrica que se genera en los generadores eólicos afecta la rapidez del viento? Esto es: ¿las localidades detrás de los generadores de viento tendrían más vientos si los generadores no estuvieran ahí?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La respuesta a las tres preguntas es *sí*, pues la energía consumida a final de cuentas proviene del combustible. Incluso la energía tomada de la batería debe regresar a la batería por medio del alternador, al cual enciende el motor, que funciona con la energía del combustible. ¡No hay comida gratuita!
2. Los generadores eólicos toman EC del viento, de modo que el viento es frenado por la interacción con los álabes. Así es que, sí, habría más viento detrás de los generadores eólicos si no estuvieran ahí.




**SCREENCAST:** La energía de acróbatas

**SCREENCAST:** Péndulo balístico

## Energía reciclada

La energía reciclada es energía reutilizada que de otro modo se desperdiciaría. Una planta eléctrica común que quema combustible fósil desecha cerca de dos tercios de la energía presente en el combustible como energía térmica de desecho. Sólo alrededor de un tercio del insumo de energía se convierte en electricidad útil. ¿Qué otro negocio desperdicia dos tercios de sus insumos? Esto no siempre fue así. Las primeras plantas eléctricas de Thomas Edison, a finales de la década de 1880, convertían muchos más insumos de energía para propósitos útiles que las plantas sólo eléctricas de la actualidad. Edison utilizaba el calor desprendido de sus generadores para calentar las casas y fábricas cercanas. La compañía que fundó todavía suministra calor a miles de edificios en Manhattan a través del sistema de vapor comercial más grande del mundo. Nueva York no es la única: la mayor parte de

las casas en la región que rodea a Copenhague, Dinamarca, se calienta con el calor proveniente de las plantas eléctricas. Más de la mitad de la energía utilizada en Dinamarca es energía reciclada. Por el contrario, la energía reciclada en Estados Unidos representa menos de 10% de toda la energía usada. Una razón principal es que en la actualidad las plantas eléctricas se construyen generalmente lejos de los edificios que se beneficiarían de la energía reciclada. Sin embargo, no es posible seguir arrojando energía térmica al cielo en un lugar y luego quemar más combustible fósil para suministrar calor en alguna otra parte. Está atento a más reciclamiento de energía.

## 7.6 Máquinas

Una **máquina** es un dispositivo que multiplica una fuerza o simplemente cambia la dirección de las fuerzas. El principio que subyace a toda máquina es el concepto de **conservación de la energía**. Piensa en una de las máquinas más sencillas, la **palanca** (Figura 7.16). Al mismo tiempo que realizas trabajo sobre un extremo de la palanca, el otro extremo hace trabajo sobre la carga. Se observa que la dirección de la fuerza cambia: si empujas hacia abajo, la carga se eleva. Si el trabajo realizado por las fuerzas de fricción y por el peso no equilibrado de la palanca es tan pequeño como para despreciarse, entonces la entrada de trabajo será igual a la salida de trabajo:

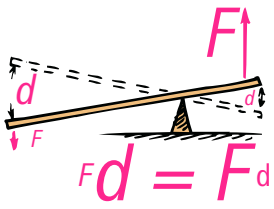



**FIGURA 7.16**
La palanca.

Entrada de trabajo = salida de trabajo

Dado que el trabajo es igual a fuerza por distancia, fuerza de entrada × distancia de entrada = fuerza de salida × distancia de salida:

$$(\text{Fuerza} \times \text{distancia})_{\text{entrada}} = (\text{fuerza} \times \text{distancia})_{\text{salida}}$$

El punto de apoyo sobre el cual gira una palanca se llama *fulcro.* Cuando el fulcro de una palanca está relativamente cerca de la carga, una pequeña fuerza de entrada producirá una gran fuerza de salida. Esto se debe a que la fuerza de entrada se ejerce por toda una gran distancia y la carga se mueve una distancia correspondientemente corta. De modo que una palanca puede ser un multiplicador de fuerza. Pero ninguna máquina puede multiplicar el trabajo o multiplicar la energía. ¡Esto definitivamente no es posible en la conservación de la energía!

Arquímedes, un famoso científico griego del siglo III a. C., comprendía el principio de la palanca. Afirmó: "Denme un punto de apoyo y moveré el mundo".

En la actualidad, un niño puede aplicar el principio de la palanca para elevar con un gato el frente de un automóvil. Al ejercer una pequeña fuerza sobre una gran distancia, ésta puede suministrar una gran fuerza que actúe en una pequeña distancia. Considera el ejemplo que se ilustra en la Figura 7.17. Cada vez que la niña empuja la palanca del gato 25 centímetros, el auto se eleva sólo una centésima de esa distancia, pero con 100 veces la fuerza. (La niña está feliz de que un trinquete sostenga el automóvil en su posición elevada mientras ella se prepara para su siguiente golpe que elevará el automóvil.)

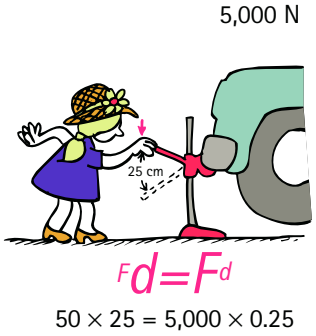



**FIGURA 7.17**
Fuerza de entrada × distancia de entrada = fuerza de salida × distancia de salida.

**VIDEO: Máquinas: poleas**

Otra máquina simple es una polea. ¿Te das cuenta de que es una palanca "disfrazada"? Cuando se usa como en la Figura 7.18a, la polea sólo cambia la dirección de la fuerza; pero cuando se usa como en la Figura 7.18b, duplica la fuerza de salida. La fuerza aumenta y la distancia recorrida disminuye. Como sucede con cualquier máquina, las fuerzas pueden cambiar aunque el trabajo de entrada y el trabajo de salida no cambien.

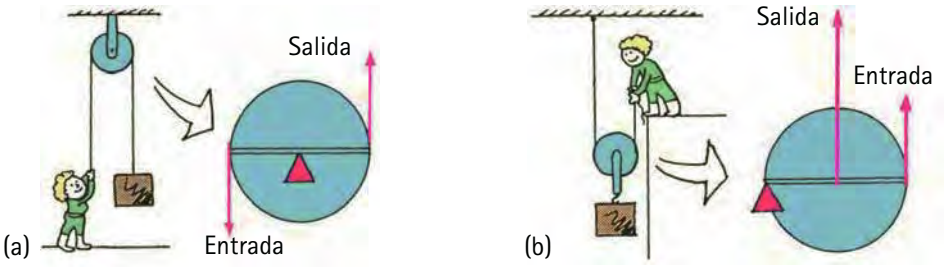



**FIGURA 7.18**
(a) Esta polea actúa como una palanca con brazos de palanca iguales. Sólo cambia la dirección de la fuerza de entrada. (b) En este arreglo, una carga puede levantarse con la mitad de la fuerza de entrada. Observa que el "fulcro" está en el extremo izquierdo en lugar de estar en el centro.

Un polispasto es un sistema de poleas que multiplica la fuerza más de lo que puede hacerlo una sola polea. Con el sistema de poleas ideal que se muestra en la Figura 7.19, el hombre jala 7 m de soga con una fuerza de 50 N y eleva una carga de 500 N por una distancia vertical de 0.7 m. La energía que el hombre gasta para jalar la soga es numéricamente igual al aumento de energía potencial del bloque de 500 N. La energía se transfiere del hombre a la carga.

Cualquier máquina que multiplica una fuerza lo hace a costa de la distancia. Del mismo modo, cualquier máquina que multiplica la distancia, como tu antebrazo y codo, lo hace a costa de una fuerza. Ninguna máquina o dispositivo puede sacar más energía de la que se pone en ella. Ninguna máquina puede crear energía; sólo puede transferir energía o transformarla de una forma a otra.

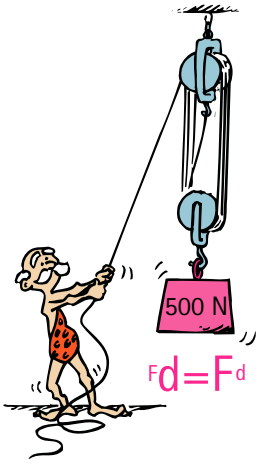



**FIGURE 7.19**
Fuerza aplicada × distancia aplicada = fuerza de salida × distancia de salida.

**SCREENCAST: Máquinas y energía**

## 7.7 Eficiencia

Los tres ejemplos previos fueron de *máquinas ideales*: 100% del trabajo de entrada aparecía como trabajo de salida. Una máquina ideal operaría al 100% de eficiencia. En la práctica, esto no sucede, y nunca se puede esperar que ocurra. En cualquier transformación, se disipa algo de energía en energía cinética molecular —energía térmica— lo cual hace que la máquina y sus alrededores se vuelvan más calientes.

Incluso una palanca se balancea en torno a su fulcro y convierte una pequeña fracción de la energía de entrada en energía térmica. Puedes realizar 100 J de trabajo y obtener 98 J de trabajo. Entonces la palanca es 98% eficiente y sólo se degradan 2 J de trabajo de entrada en energía térmica. Si la niña de la Figura 7.17 pone 100 J de trabajo y aumenta la energía potencial del automóvil en 60 J, el gato tiene una eficiencia de 60%; 40 J de su trabajo de entrada se aplicaron contra la fricción y aparecieron como energía térmica.

En un sistema de poleas, una fracción considerable de la energía de entrada por lo general se transforma en energía térmica. Si realizas 100 J de trabajo, las fuerzas de fricción que actúan a lo largo de las distancias por las cuales corren las poleas y frotan contra sus ejes pueden disipar 60 J de energía como energía térmica. En este caso, el trabajo de salida sólo es de 40 J y el sistema de poleas tiene una eficiencia de 40%. Parte de la energía de entrada también se puede "desperdiciar" al transformarse en energía potencial del propio sistema de poleas a medida que se eleva. Cuanto menor sea la eficiencia de una máquina, mayor será el porcentaje de energía que se degrade en energía térmica.

La ineficiencia existe siempre que la energía en el mundo que te rodea se transforme de una forma a otra. La **eficiencia** puede expresarse como una razón:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{salida de energía útil}}{\text{entrada de energía total}}$$

El motor de un automóvil es una máquina que transforma la energía química almacenada en el combustible en energía mecánica. Los enlaces entre las moléculas en el combustible de petróleo se descomponen cuando se quema el combustible. Los átomos de carbono en el combustible se combinan con el oxígeno del aire para formar dióxido de carbono, los átomos de hidrógeno en el combustible se combinan con el oxígeno para formar agua, y la energía se libera. Sería estupendo que toda esta energía pudiera convertirse en energía mecánica útil; es decir, sería estupendo que se pudiera tener un motor que fuera 100% eficiente. Sin embargo, esto es imposible, pues mucha de la energía se transforma en energía térmica, un poco de la cual puede aprovecharse para calentar a los pasajeros en el invierno, pero la mayor parte se

Una máquina puede multiplicar fuerza, más nunca *energía*, ¡de ninguna manera!

**pti**

- Una máquina de movimiento perpetuo (un dispositivo que puede realizar trabajo sin entrada de energía) es imposible que exista. Pero el movimiento perpetuo en sí mismo definitivamente sí existe. Por ejemplo, los átomos y sus electrones, y las estrellas y sus planetas, están en un estado de movimiento perpetuo. El movimiento perpetuo es el orden natural de las cosas.

**FIGURA 7.20**
Helen Yan lleva buena energía a su clase de laboratorio en el City College de San Francisco.

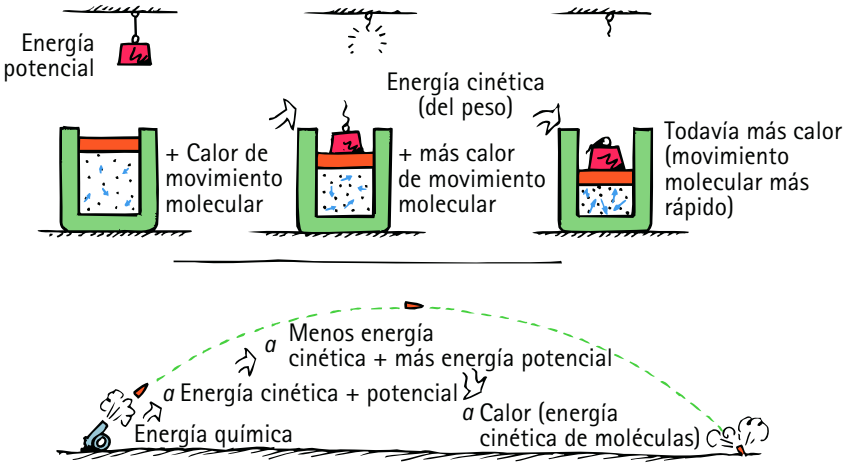



**FIGURA 7.21**
Transiciones de energía. El cementerio de la energía mecánica es la energía térmica.

desperdicia. Alguna sale junto con los gases de escape calientes, y alguna se disipa en el aire a través del sistema de enfriamiento o directamente desde las partes calientes del motor.[5]

Considera la ineficiencia que acompaña las transformaciones de la energía de esta forma: en cualquier transformación existe una disolución de la *energía útil* disponible. La cantidad de energía útil disminuye con cada transformación hasta que no queda nada más que energía térmica a temperatura ordinaria. Cuando estudies termodinámica verás que la energía térmica es inútil para realizar trabajo a menos que pueda transformarse a una temperatura inferior. Una vez que llega a la temperatura práctica más baja, la del ambiente, no se puede usar. El ambiente que te rodea es el cementerio de la energía útil.

**pti**

- Cuando se comparan las eficiencias de las formas de transporte, se descubre que el más eficiente es el ser humano en una bicicleta, mucho más eficiente que viajar en tren o automóvil, e incluso que la de los peces y otros animales. ¡Bravo por las bicicletas y quienes las usan!

## PUNTO DE CONTROL

1. **Piensa en un milagroso automóvil imaginario que tenga un motor 100% eficiente y queme combustible que tenga un contenido energético de 40 MJ por litro. Si el arrastre aerodinámico total y las fuerzas de fricción globales sobre el automóvil que viaja con rapidez de autopista es de 500 N, ¿cuánto podría el automóvil recorrer por litro de combustible a esta rapidez?**
2. **Si el mismo automóvil es impulsado por un motor 25% eficiente, ¿cuán lejos puede viajar, a rapidez de autopista, con 1 litro de combustible?**

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. De acuerdo con la definición de trabajo = fuerza × distancia, un reordenamiento sencillo produce distancia = trabajo/fuerza. Si todos los 40 millones de J de energía que hay en 1 L se usan para hacer el trabajo de superar el arrastre aerodinámico y las fuerzas de fricción, la distancia es

$$\text{Distancia} = \frac{\text{trabajo}}{\text{fuerza}} = \frac{40{,}000{,}000\ \text{J/L}}{500\ \text{N}} = 80{,}000\ \text{m/L} = 80\ \text{km/L}$$

   (Esto es aproximadamente 190 mi/gal.) El punto importante aquí es que, incluso con un motor hipotéticamente perfecto, hay un límite máximo en economía de combustible dictado por la conservación de la energía.
2. El automóvil 25% eficiente, con todo lo demás igual, puede viajar un cuarto más que el automóvil ideal del inciso 1, o 20 km por litro de combustible. (Esto es 47 mi/gal, semejante a lo que los híbridos y otros vehículos eficientes de hoy en día ofrecen en la autopista.)

**VIDEO: Conservación de la energía: ejemplo numérico**

[5]Cuando estudies termodinámica en el Capítulo 18, aprenderás que un motor de combustión interna *debe* transformar parte de su energía del combustible en energía térmica. Por otra parte, una celda de combustible que impulse vehículos no tiene esta limitación.

## 7.8 Fuentes de energía

La luz solar evapora el agua, que luego cae como lluvia; el agua de lluvia fluye hacia los ríos y hacia los depósitos detrás de las presas en donde se dirige hacia turbinas generadoras. Luego regresa al mar, donde el ciclo continúa. El Sol es la fuente de prácticamente toda la energía (excepto la proveniente de las plantas nucleares). Incluso la energía que se obtiene del petróleo, el carbón, el gas natural y la madera originalmente provino del Sol. Eso se debe a que dichos combustibles se crearon mediante fotosíntesis: el proceso por el cual las plantas captan la energía solar y la almacenan como tejido vegetal. Un kilómetro cuadrado de luz solar a mediodía puede proporcionar un gigawatt de energía eléctrica, la misma producción de una gran planta de carbón o nuclear. La energía solar es una industria verde en crecimiento.

La Figura 7.22 muestra celdas fotovoltaicas en el Parque Solar Chattanooga de Volkswagen®, en Tennessee, que contribuye a impulsar la producción de automóviles de dicha marca. En la actualidad, no sólo se trata de la mayor instalación solar de cualquier fábrica para construir automóviles en Estados Unidos, sino también del arreglo fotovoltaico más grande de la Volkswagen® en todo el mundo.

**FIGURA 7.22**
¡Abundantes celdas solares en Tennessee!

Las celdas fotovoltaicas están ganando popularidad en los materiales para construcción, fabricación de techos, mosaicos e incluso ventanas transparentes. En un inicio las celdas fotovoltaicas eran obleas de cristal producidas de la misma manera en que se fabrican los semiconductores para computadoras, o en la forma de delgados recubrimientos sobre vidrio o como refuerzo metálico. La tecnología más reciente sustituye los paneles compuestos de dichas celdas. Ahora se producen "hojas de energía" fotovoltaica ligeras y flexibles, mediante máquinas similares a prensas de impresión que enrollan tinta fotovoltaica en hojas de aproximadamente el grosor del papel de aluminio. Las hojas de energía pueden montarse casi donde sea y no necesitan estructuras resistentes.

La producción de energía solar no está confinada a la fotovoltaica. La luz solar puede reflejarse con espejos a calentadores llenos de agua encaramados en torres. La concentración de la luz solar por miles de espejos puede calentar agua a más de cuatro veces su punto de ebullición normal, que entonces se convierte en vapor supercaliente para impulsar turbinas que generan electricidad. Aunque a veces se utilizan espejos parabólicos en las plantas eléctricas térmicas solares, otras usan pequeños espejos planos, baratos y fáciles de instalar, cada uno aproximadamente del tamaño de una televisión de pantalla grande. El rastreo computarizado mantiene a cada espejo enfocado en el ángulo óptimo en el transcurso del día. Cuando el Sol no brilla, algunas instalaciones hacen funcionar las turbinas con gas natural. Además, la energía solar puede combinarse con las plantas eléctricas tradicionales de combustible fósil para aumentar su eficiencia. Ésta es *hibridación solar*. Prepárate para más hibridación de la energía solar.

**pti**

- Observa la reducción de las redes eléctricas de gran escala en la actualidad a medida que la energía solar local se extiende a edificios y vehículos. Permanecerán las redes locales más pequeñas en las áreas urbanas densas. Tal vez las grandes plantas eléctricas de todo tipo se vuelvan cada vez menos comunes, pero todavía se necesitarán cerca de las fábricas u otras instalaciones que sean grandes consumidoras de electricidad. La mayor parte de las plantas laminadoras de acero ya funcionan eléctricamente.

Tarde o temprano, toda la luz solar que cae sobre la Tierra se irradiará de vuelta al espacio. La energía de cualquier ecosistema siempre está en tránsito: puedes rentarla, mas no poseerla.

Somos como campesinos arrendatarios que tumban la cerca de su casa para usarla como combustible cuando deberíamos usar las inagotables fuentes de energía de la naturaleza: el Sol, el viento y las mareas. Yo invertiría mi dinero en el Sol y la energía solar. ¡Vaya fuente de energía! Espero que no tengamos que esperar hasta que se agoten el petróleo y el carbón antes de enfrentar esto.

*—Thomas A. Edison*

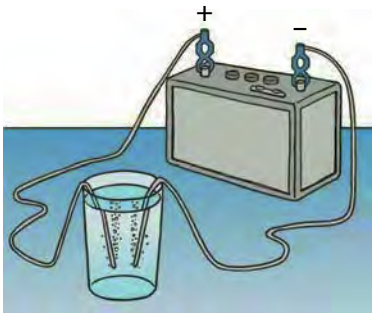



**FIGURA 7.23**
Cuando la corriente eléctrica pasa a través del agua conductora, se forman burbujas de hidrógeno en un alambre y burbujas de oxígeno en el otro. Esto es *electrólisis*. Una celda de combustible hace lo opuesto: hidrógeno y oxígeno entran en la celda de combustible y se combinan para producir electricidad y agua.

Las celdas de combustible de hidrógeno son dispositivos electroquímicos que combinan el hidrógeno almacenado con el oxígeno atmosférico para generar electricidad y vapor de agua. Los vehículos que operan con celdas de combustible son vehículos con cero emisiones; no emiten $CO_2$ directamente (sino indirectamente, si la fuente de energía que produce el hidrógeno es de plantas de combustible fósil).

Incluso el viento, causado por el desigual calentamiento de la superficie terrestre, es una forma de energía solar. La energía del viento puede utilizarse para impulsar turbinas de generador dentro de molinos de viento especialmente equipados. La energía eólica depende mucho de la ubicación: hay que colocar turbinas donde el viento sople de manera estable y fuerte, y donde salven las objeciones de los residentes que no quieren que sus panoramas y su tranquilidad se alteren. Esto puede ser en el mar, lejos de las costas. Donde el agua no es muy profunda, las torres turbinas pueden anclarse al fondo marino. En aguas más profundas, las torres pueden montarse sobre plataformas flotantes. Como la energía solar, el viento produce una energía que no deja rastro alguno de carbono directo.

El hidrógeno es el menos contaminante de todos los combustibles. La mayor parte del hidrógeno en Estados Unidos se produce a partir de gas natural, donde altas temperaturas y presiones separan el hidrógeno de las moléculas de hidrocarburo. Una desventaja de la separación del hidrógeno de los compuestos hidrocarburos es la inevitable producción de dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero. Un método más sencillo y más limpio que no produce gases de efecto invernadero es la *electrólisis*: dividir eléctricamente el agua en sus partes constituyentes. La Figura 7.23 muestra cómo puedes realizar esto en un laboratorio o en casa. Coloca dos alambres de platino que estén conectados a las terminales de una batería ordinaria en un vaso de agua (con un electrolito, como sal, disuelto en el agua para dar conductividad). Asegúrate de que los alambres no se toquen entre sí. Burbujas de hidrógeno se forman en un alambre, y burbujas de oxígeno se forman en el otro. Una celda de combustible es similar, pero opera a la inversa. Gases de hidrógeno y de oxígeno se comprimen en electrodos y se produce corriente eléctrica, junto con agua. La Estación Espacial Internacional utiliza celdas de combustible para satisfacer sus necesidades eléctricas al tiempo que produce agua potable para los astronautas. Aquí en la Tierra, los investigadores de celdas de combustible crean celdas de combustible para autobuses, automóviles y trenes.

En China, una economía de hidrógeno ya comenzó con ferrocarriles impulsados por celdas de combustible. El hidrógeno necesario para las celdas de combustible puede producirse por medios convencionales o con celdas solares. La energía solar puede extraer hidrógeno del agua. Es importante saber que el hidrógeno no es una *fuente* de energía. Se necesita energía para producir hidrógeno (para extraerlo del agua y de los hidrocarburos). Al igual que la electricidad, necesita una fuente de energía y es una forma de almacenar y transportar dicha energía. De nuevo, para recalcarlo, el hidrógeno *no* es una fuente de energía.

La energía de las olas oceánicas se explota en las costas de Portugal, donde el movimiento de pontones en la superficie del océano activa generadores sobre el fondo marino. De mayor interés es la energía de las olas oceánicas, otra fuente de energía limpia que actualmente se explota en varios lugares. En plantas ubicadas a lo largo de un estuario o en la bahía, la sobretensión de las olas oceánicas que suben y bajan activa turbinas que producen energía eléctrica, de un modo muy parecido a como el flujo de agua de las presas activa turbinas en las plantas hidroeléctricas. El río Rance en Francia ha agitado energía eléctrica durante más de 40 años, como han hecho otros en Canadá y Rusia. Esta forma de energía no es ni nuclear ni del Sol. Proviene de la energía rotacional del planeta. Espera más cantidad de plantas eléctricas de mareas a mayor escala.

**FIGURA 7.24**
En Bermudas, donde el agua fresca escasea, los techos se diseñan para captar agua, que se almacena en contenedores para uso doméstico.

La fuente de energía útil más concentrada es la de los combustibles nucleares: uranio, plutonio y, en un futuro, tal vez deuterio. Por el mismo peso de combustible, las reacciones nucleares liberan aproximadamente 1 millón de veces más energía que las reacciones químicas o las alimenticias. A pesar de la catástrofe nuclear de Fujiyama en 2011, cuando los problemas de seguridad y de almacenamiento de los desechos radiactivos se resuelvan, debes estar atento a un interés renovado en esta forma de energía que no contamina la atmósfera. Es muy interesante que el interior de la Tierra se mantenga caliente debido a la energía nuclear, que ha estado con la humanidad desde el tiempo cero.

Un subproducto de la energía nuclear en el interior de la Tierra es la energía geotérmica. La energía geotérmica se mantiene en depósitos subterráneos de roca caliente y agua caliente. La energía geotérmica relativamente cercana a la superficie está limitada de manera predominante a áreas de actividad volcánica, como Islandia, Nueva Zelanda, Japón y Hawái. En dichas ubicaciones, el agua caliente se aprovecha para proporcionar vapor e impulsar generadores eléctricos.

En otros lugares, hay otro método prometedor para producir electricidad. Se trata de la energía geotérmica de roca seca (Figura 7.26). Con este método, el agua se bombea al interior de una roca fracturada caliente muy por debajo de la superficie. Cuando el agua se convierte en vapor, se envía por una tubería hacia una turbina en la superficie. Después de activar la turbina, ésta se bombea de vuelta hacia el suelo para reutilizarla. De esta forma, la electricidad se produce limpiamente.

A medida que aumenta la población mundial, también crece su necesidad de energía, en especial si se considera que la demanda per cápita también aumenta. Guiados por las leyes de la física, los tecnólogos en la actualidad investigan formas nuevas y más limpias para desarrollar fuentes de energía. Pero corren para estar a la delantera de una población mundial creciente y una mayor demanda en el mundo en desarrollo. Por desgracia, mientras el control de la población sea política y religiosamente incorrecto, la miseria humana se convierte en el cheque para el crecimiento poblacional sin restricciones. H. G. Wells escribió alguna vez (en *El perfil de la historia*): "la historia humana se vuelve cada vez más una carrera entre educación y catástrofe".

**FIGURA 7.25**
Las celdas solares fotovoltaicas en más y más techos (y los costados de las casas, como éstas en Holanda) absorben la luz solar y la convierten en energía eléctrica.

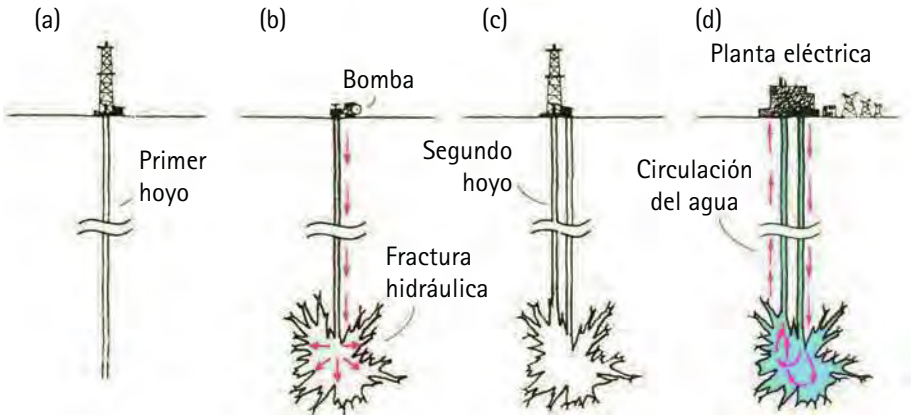



**FIGURA 7.26**
Energía geotérmica de roca seca. (a) Se cava un hoyo de varios kilómetros en granito seco. (b) Se bombea agua en el interior del hoyo a alta presión y fractura la roca circundante para formar cavidades con mayor área superficial. (c) Un segundo hoyo se cava en las cercanías. (d) El agua circula en sentido descendente por un hoyo y por la roca fracturada, donde se supercalienta, antes de ascender por el segundo hoyo. Después de impulsar una turbina, el agua vuelve a circular de nuevo en la roca caliente, lo que forma un ciclo cerrado.

## CIENCIA BASURA

Los científicos tienen que estar abiertos a nuevas ideas. Así es como crece la ciencia. Pero existe un cuerpo de conocimiento establecido que no puede derrumbarse con facilidad. En él se incluye la conservación de la energía, que se teje en cada rama de la ciencia y se apoya en incontables experimentos desde la escala atómica hasta la cósmica. Sin embargo, ningún concepto ha inspirado más "ciencia basura" que la energía. ¿No sería maravilloso si pudieras obtener energía sin costo, de la nada, o poseer una máquina que produjera más energía de la que se le pone? Eso es lo que ofrecen muchos practicantes de la ciencia basura. Inversionistas ingenuos destinan su dinero a algunos de estos proyectos. Pero ninguno de estos proyectos pasa la prueba de ser ciencia verdadera. Acaso algún día se descubra un error en la ley de conservación de la energía. Si eso sucede, los científicos se regocijarán del descubrimiento. Pero mientras tanto, la conservación de la energía es tan sólida como cualquier conocimiento que se tiene. No apuestes contra ella.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Trabajo.** El producto de la fuerza y la distancia movida por la fuerza:

$$W = Fd$$

(De manera más general, el trabajo es el componente de la fuerza en la dirección de movimiento por la distancia movida.)

**Potencia.** Tasa de tiempo del trabajo:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{trabajo realizado}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

(De manera más general, la potencia es la tasa a la que se gasta energía.)

**Energía.** Propiedad de un sistema que le permite realizar trabajo.

**Energía mecánica.** Energía debida a la posición de algo o del movimiento de algo.

**Energía potencial.** Energía que algo posee debido a su posición.

**Energía cinética.** Energía que algo posee debido a su movimiento, cuantificada por la relación:

$$\text{Energía cinética} = \frac{1}{2}mv^2$$

**Teorema trabajo-energía.** El trabajo realizado sobre un objeto es igual al cambio en la energía cinética del objeto:

$$\text{Trabajo} = \Delta\text{EC}$$

(El trabajo también puede transferir otras formas de energía a un sistema.)

**Ley de conservación de la energía.** La energía no se puede crear ni destruir; se puede transformar de una forma en otra, pero la cantidad total de energía nunca cambia.

**Máquina.** Dispositivo, como una palanca o una polea, que aumenta (o reduce) una fuerza o simplemente cambia la dirección de una fuerza.

**Conservación de energía.** La salida de trabajo de cualquier máquina no puede superar la entrada de trabajo. En una máquina ideal, donde ninguna energía se transforma en energía térmica, $\text{trabajo}_{\text{entrada}} = \text{trabajo}_{\text{salida}}$; $(Fd)_{\text{entrada}} = (Fd)_{\text{salida}}$.

**Palanca.** Máquina simple que consiste en una barra rígida pivoteada en un punto fijo llamado fulcro.

**Eficiencia.** Porcentaje del trabajo puesto en una máquina que se convierte en salida de trabajo útil. (De manera más general, salida de energía útil dividida entre la entrada de energía total.)

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 7.1 Trabajo

1. ¿Cuándo es más evidente la energía?
2. Una fuerza pone en movimiento un objeto. Cuando la fuerza se multiplica por el tiempo de su aplicación, a la cantidad se le llama *impulso,* y un impulso cambia la *cantidad de movimiento* de dicho objeto. ¿Cómo se llama a la cantidad fuerza × distancia?
3. Cita un ejemplo en el que una fuerza se ejerza sobre un objeto sin realizar trabajo sobre el objeto.
4. ¿Cuál exige más trabajo: levantar un costal de 50 kg una distancia vertical de 2 m o levantar un costal de 25 kg una distancia vertical de 4 m?
5. ¿Exactamente qué es lo que permite que un objeto realice trabajo?
6. Si los dos costales de la pregunta 4 se levantan sus respectivas distancias en el mismo tiempo, ¿cómo se compara la potencia requerida para cada uno? ¿Y qué hay del caso en el que el costal más ligero recorre su distancia en la mitad del tiempo?

### 7.2 Energía potencial

7. Un automóvil se eleva cierta distancia en el elevador de una estación de servicio y, por tanto, tiene energía potencial respecto del suelo. Si se eleva el doble de alto, ¿cuánta más energía potencial tendría?
8. Dos automóviles se elevan a la misma altura en elevadores de una estación de servicio. Si un automóvil es el doble de masivo que el otro, compara sus ganancias en energía potencial.
9. ¿Cuándo es significativa la energía potencial de algo?

### 7.3 Energía cinética

10. Cuando la rapidez de un automóvil en movimiento se duplica, ¿cuánta más energía cinética tiene?

### 7.4 Teorema trabajo-energía

11. Comparado con un automóvil que se mueve con cierta rapidez original, ¿cuánto trabajo deben suministrar los frenos de un automóvil para detener un automóvil que se mueve el doble de rápido? ¿Cómo se comparará la distancia de frenado?
12. Si empujas una caja horizontalmente con 100 N por el suelo de una fábrica de 10 m y la fricción entre la caja y el suelo son 70 N constantes, ¿cuánta energía cinética gana la caja?
13. ¿De qué manera la rapidez afecta la fricción entre un camino y una llanta que derrapa?

### 7.5 Conservación de energía

14. ¿Cuál será la energía cinética del pistón de un martinete que parte del reposo y experimenta una reducción de 10 kJ en energía potencial?
15. Una manzana que cuelga de una rama tiene una energía potencial debido a su altura. Si cae, ¿en qué se convierte esta energía justo antes de golpear el suelo? ¿Y cuando golpea el suelo?

16. ¿Cuál es la fuente de energía en la luz solar?
17. ¿Qué es la energía reciclada?

### 7.6 Máquinas

18. ¿Una máquina puede multiplicar la fuerza de entrada? ¿La distancia de entrada? ¿La energía de entrada? (Si tus tres respuestas son iguales, busca ayuda; la última pregunta es especialmente importante.)
19. Si una máquina multiplica la fuerza por un factor de 4, ¿qué otra cantidad disminuye y en cuánto?
20. Una fuerza de 50 N se aplica al extremo de una palanca, que se mueve cierta distancia. Si el otro extremo de la palanca se mueve un tercio de la distancia, ¿cuánta fuerza puede ejercer?

### 7.7 Eficiencia

21. ¿Cuál es la eficiencia de una máquina que milagrosamente convierte toda la energía de entrada en energía de salida útil?
22. Si una entrada de 100 J en un sistema de poleas aumenta la energía potencial de una carga en 60 J, ¿cuál es la eficiencia del sistema?

### 7.8 Fuentes de energía

23. ¿Cuál es la fuente última de energía en los combustibles fósiles, presas y molinos de viento?
24. ¿Cuál es la fuente última de energía geotérmica?
25. ¿Puedes decir correctamente que el hidrógeno es una nueva fuente de energía? ¿Por qué sí o por qué no?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

26. Coloca un poco de arena seca en una lata que tenga tapa. Compara la temperatura de la arena antes y después de que agitas vigorosamente la lata durante más o menos un minuto. Predice qué ocurrirá. ¿Cuál es tu explicación?
27. Haz lo mismo que el instructor de física Fred Cauthen y coloca una pelota de tenis cerca y por arriba de la parte superior de un balón de básquetbol. Suelta las pelotas juntas. Si su alineación vertical permanece constante mientras caen hacia el suelo, verás que la pelota de tenis rebota inusualmente alto. ¿Puedes reconciliar esto con la conservación de la energía?

## SUSTITUYE Y LISTO (FAMILIARIZACIÓN CON ECUACIONES)

**Trabajo = fuerza × distancia: $W = Fd$**

28. Calcula el trabajo realizado cuando una fuerza de 5 N mueve un libro 1.2 m. (Recuerda que 1 N·m = 1 J.)
29. Demuestra que, cuando una fuerza de 2.0 N mueve un libro 1.2 m, se realizan 2.4 J de trabajo.
30. Calcula el trabajo realizado cuando una fuerza de 20 N empuja un carro 3.5 m.
31. Calcula el trabajo realizado para levantar una barra de 500 N a 2.2 m sobre el suelo. (¿Cuál es la ganancia de energía potencial de la barra cuando se levanta a esta altura?)

**Potencia = trabajo/tiempo: $P = W/t$**

32. Demuestra que, para darle a un ladrillo 100 J de EP en un tiempo de 2 s, se necesitan 50 W de potencia.
33. Demuestra que, cuando una barra de 500 N se eleva 2.2 m sobre el suelo en 1.4 s, se gastan aproximadamente 786 W de potencia.

**Energía potencial gravitacional = peso × altura: $EP = mgh$**

34. Demuestra que, cuando un libro de 3.0 kg se eleva 2.0 m, su aumento en energía potencial gravitacional es 60 J.
35. Demuestra que la energía potencial gravitacional de una roca de 1,000 kg que se eleva 5 m sobre el nivel del suelo es de 50,000 J. (Puedes expresar $g$ en unidades de N/kg, porque $m/s^2$ es equivalente a N/kg.)

$$\text{Energía cinética} = \frac{1}{2}\,\text{masa} \times \text{rapidez}^2 \text{: } EC = \frac{1}{2}mv^2$$

36. Demuestra que la energía cinética de un libro de 1 kg lanzado a través de la habitación con una rapidez de 3.0 m/s es 4.5 J. (1 J es equivalente a 1 $kg \cdot m/s^2$.)
37. Calcula la energía cinética de una motoneta de 84 kg que se mueve a 10 m/s.

**Teorema trabajo-energía: Trabajo = $\Delta EC$**

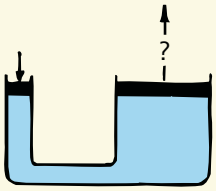
38. Demuestra que, cuando un bloque de hielo de 3.0 kg se mueve desde el reposo hasta una rapidez de 4.0 m/s, se realiza un trabajo de 24 J.
39. Demuestra que, para un avión que se mueve 500 m durante el despegue, impulsado por una fuerza de 5,000 N, ocurre un cambio en energía cinética de 2,500,000 J.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{salida de energía útil}}{\text{entrada de energía total}}$$

40. Demuestra que una máquina que tenga una entrada de 100 J y una salida de 40 J es 40% eficiente.

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

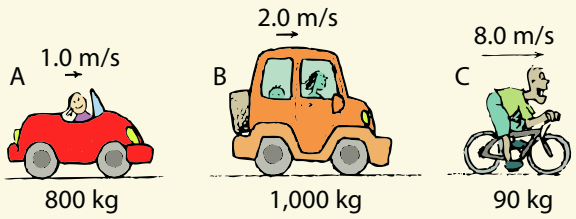
41. El segundo piso de una casa está 6 m arriba del nivel de la calle. ¿Cuánto trabajo se necesita para levantar un refrigerador de 300 kg al segundo piso?
42. (a) ¿Cuánto trabajo se realiza cuando empujas una caja horizontalmente con 100 N por el suelo de 10 m de una fábrica? (b) Si la fuerza de fricción sobre la caja es de 70 N estables, demuestra que la EC ganada por la caja es 300 J. (c) Demuestra que 700 J se convierten en calor.
43. Esta pregunta es típica en algunos exámenes que se aplican para obtener la licencia de conducir: un automóvil que se mueve a 50 km/h derrapa 15 m con los frenos bloqueados. ¿Cuánto derrapará el automóvil con los frenos bloqueados si se mueve a 150 km/h?
44. Berni Panzazo salta de un poste elevado hacia una alberca. Su energía potencial en la parte superior es 10,000 J (en relación con la superficie de la alberca). ¿Cuál es su energía cinética cuando su energía potencial se reduce a 1,000 J?
45. Nellie Newton aplica una fuerza de 50 N al extremo de una palanca, que se mueve cierta distancia. Si el otro extremo de la palanca se mueve un tercio de la distancia, demuestra que la fuerza que ejerce es 150 N.
46. Piensa en un sistema de poleas ideal. Si jalas un extremo de la soga 1 m hacia abajo con una fuerza de 50 N, demuestra que puedes levantar una carga de 200 N un cuarto de metro de alto.
47. Al elevar un piano de 5,000 N con un sistema de poleas, los trabajadores observan que, por cada 2 m de soga jalados hacia abajo, el piano se eleva 0.2 m. Idealmente, demuestra que se necesitan 500 N para levantar el piano.
48. En la máquina hidráulica que se muestra, observas que, cuando el pistón pequeño se empuja hacia abajo 10 cm, el pistón grande se eleva 1 cm. Si el pistón pequeño se empuja hacia abajo con una fuerza de 100 N, ¿cuál es el máximo peso que puede soportar el pistón grande?



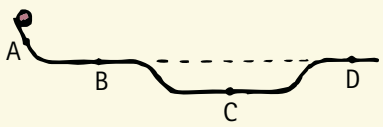

49. ¿Cuántos watts de potencia gastas cuando ejerces una fuerza de 50 N que mueve una caja 8 m en un intervalo de tiempo de 4 s?
50. Emily sostiene una banana de masa $m$ sobre el borde de un puente de altura $h$. Suelta la banana y cae al río. Mediante la conservación de energía demuestra que la rapidez de la banana justo antes de golpear el agua es $v = \sqrt{2gh}$.

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

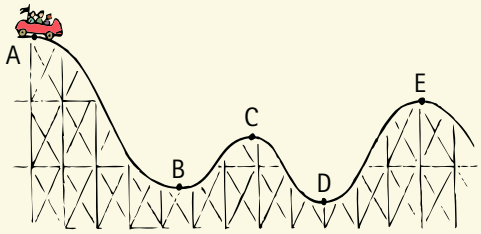
51. A continuación se muestran la masa y la rapidez de los tres vehículos, A, B y C. Clasifícalos de mayor a menor para lo siguiente:
    a. Cantidad de movimiento
    b. Energía cinética
    c. Trabajo realizado para llevarlos a sus respectivas rapideces desde el reposo



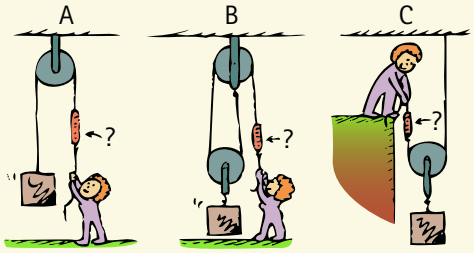

52. Una bola se suelta desde el reposo a la izquierda de la pista metálica que se muestra. Supón que sólo tiene suficiente fricción para rodar, mas no para reducir su rapidez. Clasifica estas cantidades de mayor a menor en cada punto:
    a. Cantidad de movimiento
    b. EC
    c. EP




53. El carrito de montaña rusa que se muestra parte desde el reposo en el punto A. Clasifica estas cantidades de mayor a menor en cada punto:
    a. Rapidez
    b. EC
    c. EP




54. Clasifica las lecturas del dinamómetro de mayor a menor. (Ignora la fricción.)



## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

55. ¿Por qué es más fácil detener un camión ligeramente cargado que uno más pesado que tiene igual rapidez?
56. ¿Por qué no realizas trabajo sobre una mochila de 25 kg cuando caminas una distancia horizontal de 100 mm?
57. Si tu amigo empuja una podadora cuatro veces más lejos que tú mientras ejerce solamente la mitad de la fuerza, ¿cuál de ustedes realiza más trabajo? ¿Cuánto más?
58. ¿Por qué uno se cansa cuando empuja contra una pared estacionaria cuando no se realiza ningún trabajo sobre la pared?
59. ¿Cuál requiere más trabajo: estirar un resorte fuerte cierta distancia o estirar un resorte débil la misma distancia? Defiende tu respuesta.
60. Dos personas que pesan lo mismo suben un tramo de escaleras. La primera persona sube las escaleras en 30 s, y la segunda persona, en 40 s. ¿Cuál persona realiza más trabajo? ¿Cuál usa más potencia?
61. Para determinar la energía potencial del arco tenso de Tenny (Figura 7.10), ¿sería subestimar o sobrestimar el multiplicar la fuerza con la que sostiene la flecha en su posición tensa por la distancia que lo jala? ¿Por qué se dice que el trabajo realizado es fuerza *promedio* × distancia?
62. Cuando un rifle con un barril largo se dispara, la fuerza de los gases en expansión actúa sobre la bala durante una distancia más larga. ¿Qué efecto tiene esto sobre la velocidad de la bala que sale? (¿Ves por qué los cañones de largo alcance tienen barriles tan largos?)
63. Tu amigo dice que la energía cinética de un objeto depende del marco de referencia del observador. Explica por qué estás de acuerdo o en desacuerdo.
64. Tú y un compañero de vuelo lanzan una bola de ida y vuelta en un avión en vuelo. ¿La EC de la bola depende de la rapidez del avión? Explica cuidadosamente.
65. Observas que tu amiga despega en un avión jet y comentas acerca de la energía cinética que adquiere. Pero ella dice que no experimenta tal aumento en energía cinética. ¿Quién tiene la razón?
66. Cuando un jumbo jet frena y desciende a medida que se aproxima al aterrizaje, hay una disminución tanto de su energía cinética como de su energía potencial. ¿A dónde va esta energía?
67. Explica cómo la "energía potencial elástica" cambió drásticamente el deporte de salto con pértiga cuando las pértigas flexibles de fibra de vidrio sustituyeron a las pértigas más rígidas de madera.
68. ¿En qué punto en su movimiento, la EC de la lenteja de un péndulo está en un máximo? ¿En qué punto su EP está en un máximo? Cuando su EC está a la mitad de su valor máximo, ¿cuánta EP tiene en relación con su EP en el centro del balanceo?
69. Para demostrar la conservación de la energía, un instructor de física suelta una pesada lenteja de péndulo, como se muestra en el dibujo, lo que le permite balancearse de ida y vuelta. ¿Qué sucedería si, en su entusiasmo, da a la lenteja un ligero empujón mientras abandona su nariz? Explica.

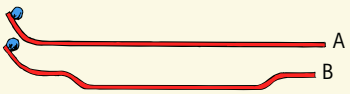
70. ¿La Estación Espacial Internacional tiene EP gravitacional? ¿EC? Explica.
71. ¿Qué dice el teorema trabajo-energía acerca de la rapidez de un satélite en órbita circular?
72. Un martillo en movimiento golpea un clavo y lo clava en una pared. Si el martillo golpea el clavo con el doble de rapidez, ¿cuánto más profundo clavará al clavo? ¿Si lo golpea con tres veces la rapidez?
73. ¿Por qué la fuerza de gravedad no funciona sobre (a) una bola de boliche que rueda sobre una bolera y (b) un satélite en órbita circular alrededor de la Tierra?
74. ¿Por qué la fuerza de gravedad funciona sobre un automóvil que rueda por una colina mas no funciona cuando rueda a lo largo de una parte a nivel del camino?
75. ¿La cuerda que sostiene la lenteja de un péndulo realiza trabajo sobre la lenteja mientras se balancea de ida y vuelta? ¿La fuerza de gravedad hace algún trabajo sobre la lenteja?
76. Una caja se jala por un suelo horizontal con una soga. Al mismo tiempo, la caja jala de vuelta sobre la soga, de acuerdo con la tercera ley de Newton. Entonces, ¿el trabajo realizado sobre la caja por la soga es igual a cero? Explica.
77. En un tobogán, un niño tiene energía potencial que disminuye en 1,000 J mientras su energía cinética aumenta en 900 J. ¿Qué otra forma de energía se involucra y en qué cantidad?
78. Alguien que quiere venderte una superbola afirma que rebotará hasta una altura mayor que la altura de la cual se suelte. ¿Puede ocurrir esto?
79. ¿Por qué una superbola, soltada desde el reposo, no puede alcanzar su altura original cuando rebota desde un suelo rígido?
80. Considera una bola lanzada en línea recta hacia arriba en el aire. ¿En qué posición su energía cinética está en un máximo? ¿Dónde está en un máximo su energía potencial gravitacional?
81. Discute el diseño de la montaña rusa que se muestra en el dibujo, en términos de la conservación de energía.

82. Supón que tú y dos compañeros de clase discuten el diseño de una montaña rusa. Un compañero de clase dice que cada cima debe estar más abajo que la anterior. Tu otro compañero dice que esto no tiene sentido, porque siempre y cuando la primera sea la más alta, no importa qué altura tengan las demás. ¿Tú qué opinas?
83. Cuando la chica de la Figura 7.17 levanta con el gato hidráulico el automóvil, ¿cómo la aplicación de tan poca fuerza puede producir suficiente fuerza para elevar el automóvil?
84. ¿Qué famosa ecuación de Albert Einstein describe la relación entre masa y energía?
85. Cuando la masa de un objeto en movimiento se duplica sin cambio en rapidez, ¿en qué factor cambió su cantidad de movimiento? ¿En qué factor cambió su energía cinética?

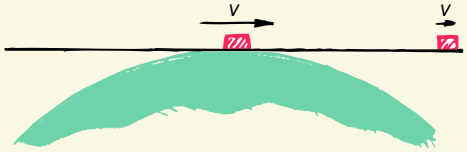
86. Cuando la velocidad de un objeto se duplica, ¿en qué factor cambia su cantidad de movimiento? ¿En qué factor cambia su energía cinética?
87. ¿Cuál, si alguna, tiene mayor cantidad de movimiento: una bola de 1 kg que se mueve a 2 m/s o una bola de 2 kg que se mueve a 1 m/s? ¿Cuál tiene mayor energía cinética?
88. Un automóvil tiene la misma energía cinética cuando viaja hacia el norte que cuando da vuelta y viaja al sur. ¿La cantidad de movimiento del automóvil es la misma en ambos casos?
89. Si la EC de un objeto es cero, ¿cuál es su cantidad de movimiento?
90. Si su cantidad de movimiento es cero, ¿su energía cinética necesariamente también es cero?
91. Si dos objetos tienen iguales energías cinéticas, ¿necesariamente tienen la misma cantidad de movimiento? Defiende tu respuesta.
92. Dos trozos de arcilla con cantidades de movimiento iguales y opuestas tienen una colisión frontal y llegan al reposo. ¿Se conserva su cantidad de movimiento? ¿Se conserva su energía cinética? ¿Por qué tus respuestas son iguales o diferentes?
93. Las tijeras para cortar papel tienen hojas largas y mangos cortos, en tanto que las tijeras para cortar metal tienen mangos largos y hojas cortas. Las cizallas tienen mangos muy largos y hojas muy cortas. ¿Por qué esto es así?
94. Se dice que una máquina ineficiente "desperdicia energía". ¿Esto significa que la energía realmente se pierde? Explica.
95. Si un automóvil tuviera un motor 100% eficiente, y transfiriera toda la energía del combustible a trabajo, ¿el motor estaría caliente al tacto? ¿Su escape calentaría el aire circundante? ¿Haría algún ruido? ¿Vibraría? ¿Parte de su combustible sería inútil?
96. Tu amigo dice que una forma de mejorar la calidad del aire en una ciudad es hacer que los semáforos se sincronicen de modo que los automovilistas puedan recorrer largas distancias con rapidez constante. ¿Qué principio físico sustenta esta afirmación?
97. La energía que necesitas para vivir proviene de la energía potencial químicamente almacenada en los alimentos, que se transforma en otras formas de energía durante el proceso de metabolismo. ¿Qué le ocurre a una persona cuya salida de trabajo y calor combinados es menor que la energía consumida? ¿Qué ocurre cuando la salida de trabajo y calor de la persona es mayor que la energía consumida? ¿Una persona desnutrida puede realizar trabajo adicional sin alimento adicional? Defiende tus respuestas.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

98. Discute si, una vez usada, la energía puede o no regenerarse. ¿Tu razonamiento es congruente con el término común *energía renovable*?
99. Discute qué tienen que ver la paz, la cooperación y la seguridad internacionales con la satisfacción de las necesidades energéticas del mundo.
100. Considera las bolas idénticas soltadas desde el reposo sobre las pistas A y B, como se muestra. Cuando llegan a los extremos derechos de las pistas, ¿cuál tendrá mayor rapidez? ¿Por qué esta pregunta es más fácil de responder que la similar (Piensa y discute 95) del Capítulo 3?




101. ¿Un automóvil quema más gasolina cuando sus luces se encienden? ¿El consumo global de gasolina depende de si el motor opera o no mientras las luces están encendidas? Discute esto y defiende tu respuesta.
102. Supón que un objeto se pone a deslizar con una rapidez menor a la velocidad de escape sobre un plano infinito sin fricción en contacto con la superficie de la Tierra, como se muestra. Describe su movimiento. (¿Se deslizará por siempre con velocidad constante? ¿Se deslizará hasta detenerse? ¿En qué forma sus cambios de energía serán similares a los de un péndulo?)



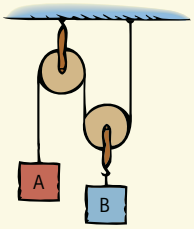

103. El Sol produce el doble de energía solar en 2 horas de lo que hace en 1 hora. Pero la *potencia* solar del Sol es la misma de una hora a la siguiente. Distingue entre los términos *energía solar* y *potencia solar.*
104. Si una bola de golf y una bola de ping-pong se mueven con la misma energía cinética, ¿puedes decir cuál tiene mayor rapidez? Explica en términos de la definición de EC. De igual modo, en una mezcla gaseosa de moléculas pesadas y moléculas ligeras con la misma EC promedio, ¿puedes decir cuál tiene mayor rapidez?
105. Operar el acondicionador de aire de un automóvil por lo general aumenta el consumo de combustible. Pero, a ciertas rapideces, un automóvil con sus ventanas abiertas y con el acondicionador de aire apagado puede consumir más combustible. Discute y explica.
106. Discute por qué uno ni siquiera debería molestarse en usar una máquina si no puede multiplicar el trabajo de entrada para lograr mayor trabajo de salida. Entonces, ¿cuál es el uso de una máquina?
107. Tú le dices a un amigo que es imposible que una máquina produzca más energía de la que se le pone y tu amigo afirma que un reactor nuclear produce más energía de la que se le pone. ¿Tú qué respondes?
108. Ésta puede parecer una pregunta sencilla para que un físico la responda: ¿con qué fuerza una roca que pesa 10 N golpea el suelo si se le suelta desde una posición de reposo a 10 m de altura? De hecho, la pregunta no puede responderse a menos que tengas más información. Discute por qué esto es así.
109. Tu compañero de discusión está confundido con las ideas estudiadas en el Capítulo 4 que parecen contradecir las ideas estudiadas en este capítulo. Por ejemplo,

en el Capítulo 4, aprendiste que la fuerza neta es cero cuando un automóvil viaja por un camino a nivel con velocidad constante pero, en este capítulo, aprendiste que, en tal caso, se realiza trabajo. Tu compañero de discusión pregunta: "¿cómo puede realizarse trabajo cuando la fuerza neta es igual a cero?". Discute tu explicación.

110. En ausencia de resistencia del aire, una bola lanzada verticalmente hacia arriba con cierta EC inicial regresará a su nivel original con la misma EC. Cuando la resistencia del aire es un factor que afecta la bola, ¿regresará a su nivel original con la misma, menor o más EC? ¿Tu respuesta contradice la ley de conservación de la energía?

111. Estás en un techo y lanzas una bola al suelo y otra hacia arriba. La segunda bola, después de elevarse, cae y también golpea el suelo abajo. Si la resistencia del aire puede despreciarse, y si sus rapideces iniciales descendente y ascendente son las mismas, ¿cuál es la diferencia entre las rapideces de las bolas al golpear el suelo? (Usa la idea de conservación de la energía para llegar a tu respuesta.)

112. En el sistema de poleas que se muestra, el bloque A tiene una masa de 10 kg y está suspendido precariamente en reposo. Supón que las poleas y la cuerda no tienen masa y que no hay fricción. Que no haya fricción significa que la tensión en una parte de la cuerda de sostén es la misma en cualquiera otra parte. Discute por qué la masa del bloque B es 20 kg.



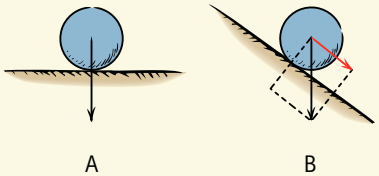

113. Al subir por la colina, el motor de gasolina de un automóvil híbrido gasolina-eléctrico suministra 75 caballos de fuerza mientras que la potencia total que lo impulsa es de 90 caballos de fuerza. Quemar gasolina proporciona los 75 caballos de fuerza. Discute qué proporciona los otros 15 caballos de fuerza.

114. Cuando un conductor aplica los frenos para que un automóvil que desciende por la colina se mantenga con rapidez constante y con energía cinética constante, la energía potencial del automóvil disminuye. ¿A dónde va esta energía? Por el contrario, discute a dónde va la mayor parte de ella con un vehículo híbrido.

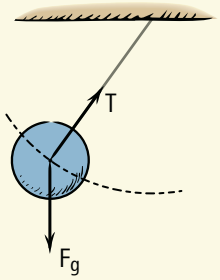
115. ¿La EC de un automóvil cambia más cuando pasa de 10 a 20 km/h o cuando pasa de 20 a 30 km/h?

116. ¿Algo puede tener energía sin tener cantidad de movimiento? Explica. ¿Algo puede tener cantidad de movimiento sin tener energía? Discute y defiende tu respuesta.

117. La gravedad no realiza ningún trabajo sobre una bola de boliche que está en reposo o se mueve sobre una bolera porque la fuerza de la gravedad sobre la bola actúa perpendicular a la superficie. Pero sobre un plano inclinado, la fuerza de gravedad tiene un componente vectorial paralelo a la bolera, como en B. ¿De qué manera este componente explica (a) la aceleración de la bola y (b) el trabajo realizado sobre la bola para cambiar su energía cinética?




118. Considera una lenteja unida a una cuerda, un péndulo simple, que se balancea de ida y vuelta. (a) ¿Por qué la fuerza de tensión en la cuerda no realiza trabajo sobre el péndulo? (b) Sin embargo, explica por qué la fuerza debida a la gravedad sobre el péndulo casi en cada punto *sí* realiza trabajo sobre el péndulo. (c) ¿Cuál es la única posición del péndulo donde no ocurre "trabajo por la gravedad"?




119. Considera un satélite en una órbita circular sobre la superficie de la Tierra. En el Capítulo 10 aprenderás que la fuerza de la gravedad sólo cambia la dirección de movimiento de un satélite en movimiento circular (y lo mantiene en un círculo); NO cambia la rapidez del satélite. El trabajo realizado sobre el satélite por la fuerza gravitacional es cero. ¿Cuál es tu explicación?

120. Considera el aparato de bolas que se balancean ("cuna de Newton"). Si dos bolas se elevan y se liberan, la cantidad de movimiento se conserva conforme dos bolas se disparan en el otro lado con la misma rapidez que las bolas soltadas al impacto. Pero la cantidad de movimiento también se conservaría si una bola se disparara con el doble de rapidez. Discute por qué esto nunca ocurre. (Y explica por qué este ejercicio está en el Capítulo 7 en lugar de en el Capítulo 6.)

121. Para combatir los hábitos de desecho, con frecuencia se habla de "conservar la energía", con lo que se entiende apagar las luces y el agua caliente cuando no se usan y mantener los termostatos en un nivel moderado. En este capítulo también se habla de "conservación de la energía". Discute y distingue entre estas dos frases.

122. Cuando una compañía eléctrica no puede satisfacer la demanda de electricidad de sus clientes en un caluroso día de verano, ¿el problema debería llamarse "crisis energética" o "crisis de potencia"? Discute.

# 8

CAPÍTULO 8

# Movimiento rotacional


8.1 Movimiento circular

8.2 Inercia rotacional

8.3 Momento de torsión

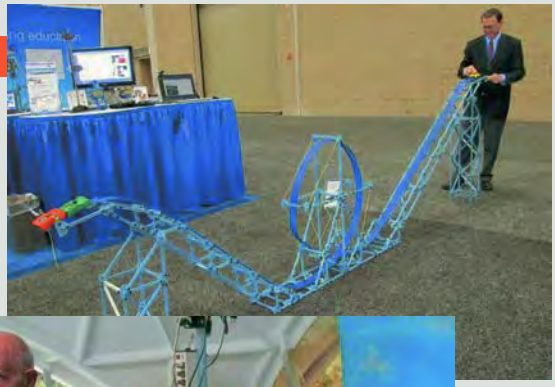
8.4 Centro de masa y centro de gravedad

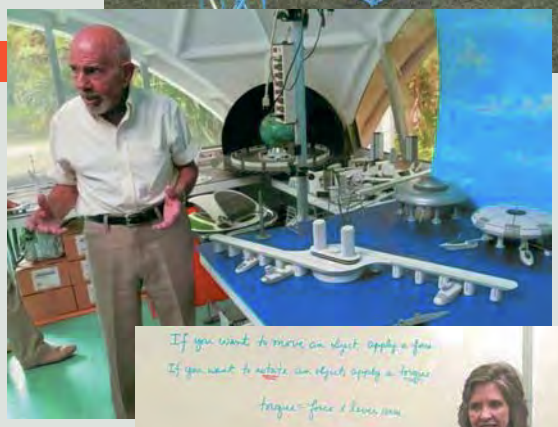
8.5 Fuerza centrípeta

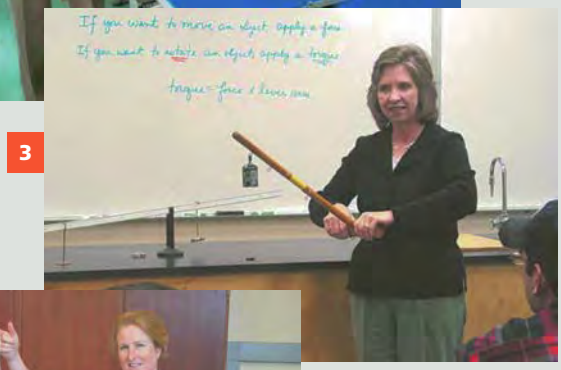
8.6 Fuerza centrífuga

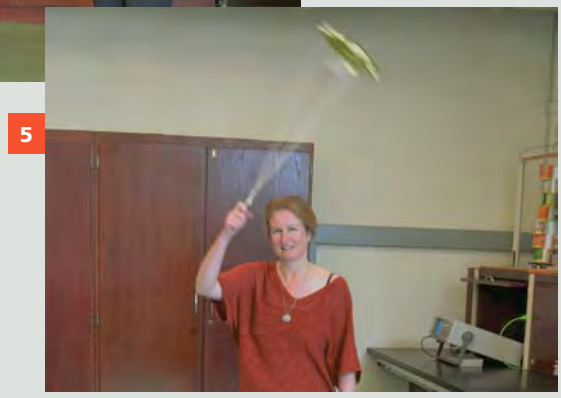
8.7 Cantidad de movimiento angular

8.8 Conservación de la cantidad de movimiento angular

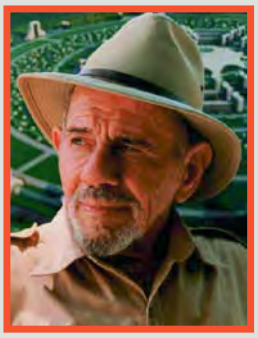






**1** ¿Desde qué distancia vertical sobre la parte superior del bucle, Paul Stokstad, fundador de Pasco, debe soltar el carro para lograr un movimiento de vuelta completa? **2** El futurista Jacque Fresco, el más apasionado profesor que he encontrado jamás, inspiró mi amor por la docencia. **3** Mary Beth Monroe demuestra el uso de un "sensor de momento de torsión" antes de pasarlo entre sus estudiantes para que lo prueben. **4** Diana Lininger Markham coloca un contenedor con agua abierto sobre el plato verde, **5** que, cuando lo balancea en una trayectoria circular, ¡no se derrama! ¿Por qué?

El pensador futurista Jacque Fresco fue la influencia más destacada en mi transición de ser un pintor de carteles a seguir una vida en la física. Conocí a Fresco por mi compañero en la pintura de carteles, Burl Grey, en Miami, Florida. Mi esposa y yo, junto con nuestro amigo caricaturista Ernie Brown, asistimos a las conferencias dinámicas semanales de Fresco en Miami Beach y a veces en su casa de Coral Gables. El carismático Jacque siempre ha sido un visionario y tiene la convicción de que la mejor ruta hacia un futuro mejor es por la vía de la ciencia y la tecnología, y que probablemente una comunidad con más ingenieros que abogados sea mejor. Sus temas giran en torno a la importancia de la tecnología ampliada para vivir mejor, local y globalmente. En mi experiencia, Jacque fue y es el mejor de los profesores, una enorme influencia en mi propia enseñanza. Él me enseñó que, para introducir conceptos nuevos a los alumnos, primero hay que compararlos con ideas familiares: enseñar por analogía. Él sentía que poco o nada se aprendería si no se asociaba a algo similar, familiar y ya comprendido. Tenía un "detector de tonterías" integrado que garantizaba que pondría el énfasis en las partes centrales de una idea. Sus estudiantes salían de cada conferencia con conocimiento valioso. La experiencia me convenció de que debía aprovechar el proyecto de ley GI (yo era un veterano no combatiente de la guerra de Corea), conseguir una educación universitaria y seguir una carrera en ciencia.



Jacque Fresco, con su socia, Roxanne Meadows, fundaron *The Venus Project* y la organización no lucrativa *Future by Design* que refleja la culminación de la obra de Fresco: la integración de lo mejor de la ciencia y la tecnología en un plan muy completo para una nueva sociedad con base en intereses humanos y ambientales, una visión global de esperanza por el futuro de la humanidad en la era tecnológica. Su visión está bien establecida en sus muchos libros y publicaciones, en la web y en la película *Zeitgeist Addendum*. Ahora, con más de 90 años de edad, sigue inspirando a jóvenes y adultos en todo el mundo.

En sus conferencias típicas, Jacque abordaba las diferencias entre ideas muy relacionadas, así como sus semejanzas. Recuerdo una de sus clases en la que señaló la diferencia entre el movimiento lineal y el movimiento rotacional. ¿En qué lugar un niño se mueve más rápido en un tiovivo: cerca de la pista exterior o cerca de la pista interior, o la rapidez es la misma en ambos sitios? Debido a que la diferencia entre rapidez lineal y rapidez rotacional no se comprende bien, Jacque señaló que plantear esta pregunta a diferentes personas genera distintas respuestas. Así como el "artillero de cola" al final de una línea de patinadores que da una vuelta se mueve más rápido que los patinadores cerca del centro de la curva, del mismo modo las ruedas de un ferrocarril en el riel exterior de una curva viajan más rápido que las ruedas en el riel interior. Jacque explicó cómo el leve golpeteo de los bordes de las ruedas hace esto posible. Esta y otras semejanzas y diferencias se abordan en este capítulo.

## 8.1 Movimiento circular

La rapidez lineal, que se denomina simplemente *rapidez* en capítulos anteriores, es la distancia recorrida por unidad de tiempo. Un punto en el borde exterior de un tiovivo o tornamesa recorre una mayor distancia en una rotación completa que un punto más cerca del centro. Recorrer una mayor distancia en el mismo tiempo significa una mayor rapidez. La rapidez lineal es mayor en el borde exterior de un objeto en rotación que más cerca del eje. La rapidez lineal de algo que se mueve por una trayectoria circular puede llamarse **rapidez tangencial** porque la dirección de movimiento es tangente a la circunferencia del círculo. Para el movimiento circular puedes usar los términos *rapidez lineal* y *rapidez tangencial* de manera indistinta. Las unidades de la rapidez lineal o tangencial por lo general son m/s o km/h.

La **rapidez rotacional** (en ocasiones llamada *rapidez angular*) es el número de rotaciones o revoluciones por unidad de tiempo. Todas las partes del tiovivo rígido y de la tornamesa giran en torno al eje de rotación en la misma cantidad de tiempo. Por ende, todas las partes comparten la misma tasa de rotación, o el mismo *número de rotaciones o revoluciones por unidad de tiempo.* Es común expresar las tasas rotacionales en revoluciones por minuto (RPM).[1] Por ejemplo, la mayoría de las tornamesas fonográficas,

**pti**

- Cuando un objeto gira en torno a un eje interno, el movimiento es una *rotación* o giro. Un tiovivo, una tornamesa y la Tierra giran en torno a un eje interno central. Sin embargo, el término *revolución*, se refiere a un objeto que se mueve en torno a un eje externo. La Tierra *revoluciona* en torno al Sol una vez cada año, en tanto que *rota* en torno a su eje polar una vez al día.

[1]Los físicos por lo general describen la rapidez rotacional, $\omega$, en términos del número de "radianes" girados en una unidad de tiempo. Hay un poco más de 6 radianes en una rotación completa ($2\pi$ radianes, para ser exactos). Cuando se asigna una dirección a la rapidez rotacional, se le llama *velocidad rotacional* (con frecuencia llamada *velocidad angular*). La velocidad rotacional es un vector cuya magnitud es la rapidez rotacional. Por convención, el vector de velocidad rotacional yace a lo largo del eje de rotación y apunta en la dirección de avance de un tornillo convencional de giro derecho.

**VIDEO:** Rapidez rotacional

**SCREENCAST:** Movimiento circular

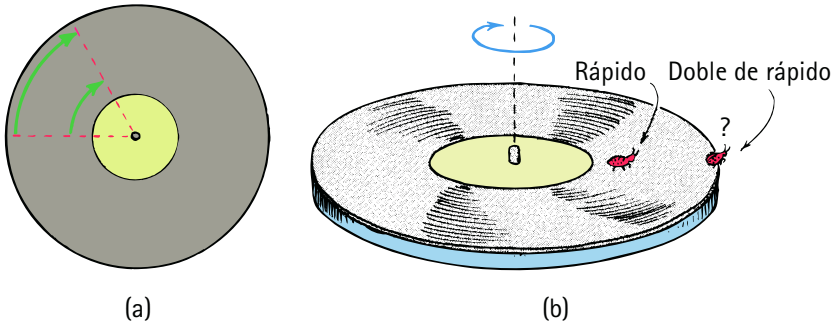



**FIGURA 8.1**
(a) Cuando la tornamesa gira, un punto más alejado del centro recorre una trayectoria más larga en el mismo tiempo y tiene mayor rapidez tangencial. (b) Una mariquita al doble de lejos del centro se mueve el doble de rápido.

Cuando una hilera de personas, con los brazos entrelazados en la pista de patinaje, hace un giro, el movimiento del "artillero de cola" es evidencia de una mayor rapidez tangencial.

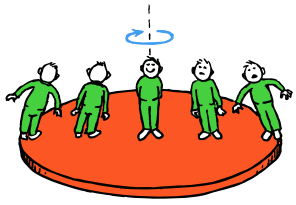


**FIGURA 8.2**
La rapidez tangencial de cada persona es proporcional a la rapidez rotacional de la plataforma multiplicada por la distancia respecto del eje central.

**SCREENCAST:** Ruedas de ferrocarril

¿Por qué una persona con una pierna más corta que la otra tiende a caminar en círculos cuando se pierde?

que eran comunes en la época de mamá y papá, giran a $33\frac{1}{3}$ RPM. Una mariquita sentada en cualquier parte sobre la superficie de la tornamesa gira a $33\frac{1}{3}$ RPM.

La rapidez tangencial y la rapidez rotacional están relacionadas. ¿Alguna vez has viajado en una gran plataforma giratoria redonda en un parque de diversiones? Mientras más rápido gira, mayor es tu rapidez tangencial. Esto tiene sentido; cuanto mayores sean las RPM, mayor será tu rapidez en metros por segundo. Se dice que la rapidez tangencial es *directamente proporcional* a la rapidez rotacional a cualquier distancia fija desde el eje de rotación.

La rapidez tangencial, a diferencia de la rapidez rotacional, depende de la distancia radial (la distancia desde el eje). En el centro mismo de la plataforma giratoria, no tienes rapidez tangencial en absoluto; simplemente giras. Pero, a medida que te aproximas al borde de la plataforma, descubres que te mueves cada vez más rápido. La rapidez tangencial es directamente proporcional a la distancia respecto del eje para cualquier rapidez rotacional dada.

De modo que se ve que la rapidez tangencial es proporcional tanto a la distancia radial como a la rapidez rotacional:[2]

$$\text{Rapidez tangencial} \sim \text{distancia radial} \times \text{rapidez rotacional}$$

En forma simbólica,

$$v \sim r\omega$$

donde $v$ es la rapidez tangencial y $\omega$ (letra griega omega minúscula) es la rapidez rotacional. Te mueves más rápido si la tasa de rotación aumenta (mayor $\omega$). También te mueves más rápido si te alejas más del eje (mayor $r$). Aléjate el doble del eje rotacional en el centro y te mueves el doble de rápido. Aléjate tres veces y tienes tres veces más rapidez tangencial. Si te encuentras en algún tipo de sistema giratorio, tu rapidez tangencial depende de cuán lejos estés del eje de rotación.

Cuando la rapidez tangencial experimenta un cambio, se habla de una *aceleración tangencial*. Cualquier cambio en la rapidez tangencial indica una aceleración paralela al movimiento tangencial. Por ejemplo, una persona sobre una plataforma giratoria que acelera o frena experimenta una aceleración tangencial. Pronto verás que cualquier cosa que se mueve en una trayectoria curva experimenta otro tipo de aceleración, una dirigida hacia el centro de curvatura. Ésta es *aceleración centrípeta*. Para no "sobrecargarte de información", no se entrará en detalles de la aceleración tangencial o centrípeta.

[2]Si tomas un curso avanzado de física, aprenderás que, cuando se usan las unidades adecuadas para la rapidez tangencial $v$, la rapidez rotacional $\omega$ y la distancia radial $r$, la proporción directa de $v$ tanto con $r$ como con $\omega$ se convierte en la ecuación exacta $v = r\omega$. De modo que la rapidez tangencial será directamente proporcional a $r$ cuando todas las partes de un sistema tengan simultáneamente la misma $\omega$, para una rueda o un disco (¡o un matamoscas!).

## RUEDAS EN LOS FERROCARRILES

¿Por qué un ferrocarril en movimiento permanece sobre las vías? La mayoría de las personas supone que los flancos de las ruedas impiden que las ruedas descarrilen. Pero, si observas dichos flancos, probablemente notarás que están herrumbrosos. Rara vez tocan el riel, excepto cuando siguen las hendiduras que cambian al tren de un conjunto de vías a otro. Así que, ¿cómo es que las ruedas de un tren permanecen en los rieles? Permanecen en los rieles porque sus bordes están ligeramente inclinados.

Si ruedas un vaso inclinado por una superficie, éste sigue una trayectoria curva (Figura 8.3). La parte más ancha del vaso tiene un radio más grande, rueda mayor distancia por cada revolución y, por tanto, tiene mayor rapidez tangencial que la parte angosta. Si unes un par de vasos por sus extremos anchos (simplemente pégalos con cinta) y ruedas el par a lo largo de un par de rieles paralelos, los vasos permanecerán sobre las vías y se centrarán siempre que rueden fuera del centro (Figura 8.4). Esto ocurre porque, cuando el par rueda hacia la izquierda del centro, por decir, la parte ancha del vaso izquierdo viaja sobre el riel izquierdo en tanto la parte estrecha del vaso derecho viaja sobre el riel derecho. Esto dirige el par hacia el centro. Si el par se "excede" hacia la derecha, el proceso se repite, esta vez hacia la izquierda, a medida que las ruedas tienden a centrarse ellas mismas. Lo mismo ocurre con un ferrocarril, donde los pasajeros sienten los vaivenes del tren a medida que estas acciones correctivas tienen lugar.

Esta forma inclinada es esencial en las curvas de las vías de ferrocarril. En cualquier curva, la distancia a lo largo de la parte exterior es más larga que la distancia a lo largo de la parte interior (como en la Figura 8.1a). De modo que, siempre que un vehículo siga una curva, sus ruedas exteriores viajan más rápido que sus ruedas interiores. Para un automóvil, esto no es un problema porque las ruedas son libres y ruedan independientemente unas de otras. Sin embargo, un tren, como el par de vasos unidos, tiene pares de ruedas que se conectan firmemente y giran juntas. Ruedas opuestas tienen las mismas RPM en cualquier momento. Pero, debido al borde ligeramente inclinado de la rueda, su rapidez tangencial a lo largo del riel depende de si viaja en la parte angosta del borde o en la parte ancha. En la parte ancha, viaja más rápido. De modo que, cuando un tren negocia una curva, las ruedas en el riel exterior viajan en la parte más ancha de los bordes inclinados, en tanto que las ruedas opuestas viajan en sus partes angostas. De esta forma, las ruedas tienen diferentes rapideces tangenciales para la misma rapidez rotacional. ¡Esto es $v \sim r\omega$ en acción! ¿Puedes ver que, si las ruedas no estuvieran inclinadas, ocurrirían raspaduras y las ruedas chirriarían cuando un tren da la vuelta por una curva?

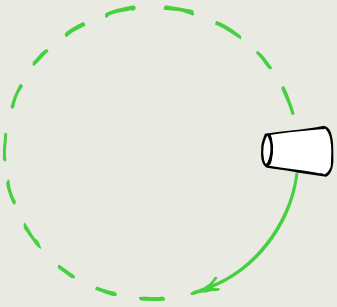


**FIGURA 8.3**
Puesto que la parte ancha del vaso rueda más rápido que la parte angosta, el vaso rueda en una curva.

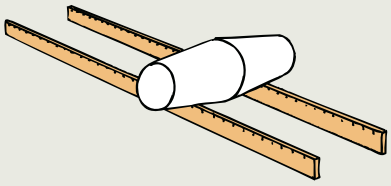


**FIGURA 8.4**
Dos vasos unidos permanecen sobre las vías mientras ruedan porque, cuando se salen del centro, las diferentes rapideces tangenciales debidas a la inclinación hacen que se autocorrijan hacia el centro de la vía.

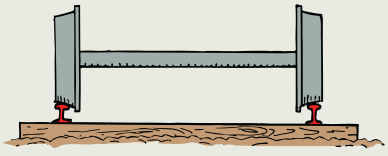
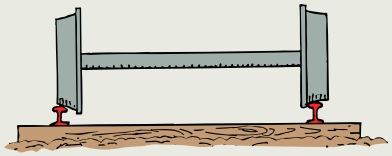
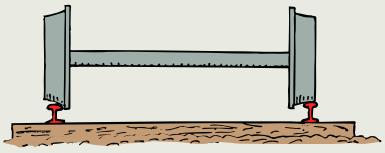


**FIGURA 8.5**
Las ruedas de un ferrocarril están ligeramente inclinadas (aquí se muestran exageradas).



La parte angosta de la rueda izquierda va más lento, de modo que las ruedas curvan a la izquierda



La parte ancha de la rueda izquierda va más rápido, de modo que las ruedas curvan a la derecha

**FIGURA 8.6**
(Arriba) A lo largo de una vía que se curva hacia la izquierda, la rueda derecha viaja en su parte ancha y va más rápido, en tanto que la rueda izquierda viaja sobre su parte angosta y va más lento. (Abajo) Lo opuesto es cierto cuando la vía se curva a la derecha.

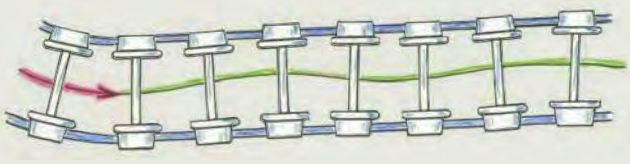


**FIGURA 8.7**
Después de negociar una curva, un tren con frecuencia oscila en la parte recta conforme las ruedas se autocorrigen.

**FIGURA 8.8**
Cathy Candler pregunta a sus alumnos cuál conjunto de vasos se autocorregirá cuando los ponga a rodar a lo largo de un par de "rieles métricos".

**pti**

- Una idea que se planteó en años pasados para aumentar la eficiencia de los viajes en rieles eléctricos fue la de los discos masivos de fricción (volantes de inercia) debajo del suelo de los vagones de ferrocarril. Cuando se aplicaran los frenos, en lugar de frenar los vagones mediante la conversión de la energía de frenado en calor por vía de la fricción, la energía de frenado se destinaría a hacer girar los volantes de inercia, que entonces podrían poner en marcha generadores que suministraran energía eléctrica para hacer funcionar el tren. El carácter masivo de los discos de fricción resultó impráctico, pero la idea no se perdió. Los automóviles híbridos de hoy hacen en gran parte lo mismo, no de manera mecánica, sino eléctrica. La energía de frenado se desvía hacia baterías eléctricas, que luego se utilizan para hacer funcionar al automóvil.

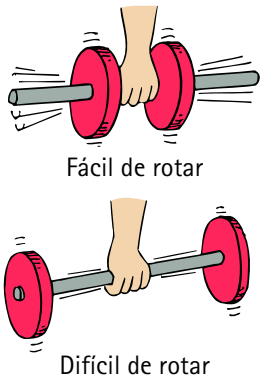



**FIGURA 8.9**
La inercia rotacional depende de la distribución de la masa en relación con el eje de rotación.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Imagina una mariquita sentada a la mitad entre el eje de rotación y el borde exterior de la tornamesa de la Figura 8.1b. Cuando la tornamesa tiene una rapidez rotacional de 20 RPM y el bicho tiene una rapidez tangencial de 2 cm/s, ¿cuáles serán las rapideces rotacional y tangencial de su amiga que se sienta en el borde exterior?**
2. **Los trenes viajan sobre un par de rieles. Para el movimiento en línea recta, ambos rieles tienen la misma longitud. Sin embargo, esto no es así para los rieles que corren por una curva. ¿Cuál riel es más largo: el que está en el exterior de la curva o el que está en el interior?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Dado que todas las partes de la tornamesa tienen la misma rapidez rotacional, su amiga también gira a 20 RPM. La rapidez tangencial es otra historia: dado que la amiga está al doble de distancia del eje de rotación, se mueve el doble de rápido, 4 cm/s.
2. Igual que en la Figura 8.1a, el riel en el exterior de la curva es más largo, de la misma manera como la circunferencia de un círculo de mayor radio es más larga.

## 8.2 Inercia rotacional

Así como un objeto en reposo tiende a permanecer en reposo y un objeto en movimiento tiende a permanecer en movimiento en una línea recta, *un objeto que gira en torno a un eje tiende a permanecer girando en torno al mismo eje a menos que alguna influencia externa interfiera en él.* (Dentro de poco verás que esta influencia externa se llama correctamente *momento de torsión*.) La propiedad de un objeto de resistir los cambios en su estado de movimiento rotacional se llama **inercia rotacional**.[3] Los cuerpos que giran tienden a permanecer en rotación, en tanto que los cuerpos que no giran tienden a permanecer sin rotación. En ausencia de influencias externas, un trompo en rotación sigue girando, en tanto que un trompo en reposo permanece en reposo.

Al igual que la inercia para el movimiento lineal, la inercia rotacional depende de la masa. El grueso disco de piedra que gira debajo de una rueda de alfarero es muy masivo y, una vez que gira, tiende a permanecer girando. Pero, a diferencia del movimiento lineal, la inercia rotacional depende de la distribución de la masa en torno al eje de rotación. Cuanto mayor sea la distancia entre la concentración de masa de un objeto y el eje, mayor será la inercia rotacional. Esto es evidente en los volantes de inercia industriales que se construyen de modo que la mayor parte de su masa se concentre lejos del eje, a lo largo del borde. Una vez en rotación, tienen una mayor tendencia a permanecer en rotación. Cuando están en reposo, es más difícil ponerlos en rotación.

Los volantes de inercia industriales constituyen un medio práctico de almacenamiento de energía en las centrales eléctricas. Cuando las plantas generan electricidad de manera continua, la energía que no se necesita cuando la demanda de electricidad es baja se desvía hacia volantes masivos, que son la contraparte de las baterías eléctricas, pero inocuos para el ambiente, sin metales tóxicos ni desechos peligrosos. Luego las ruedas giratorias se conectan a generadores que liberan la energía cuando se necesita. Cuando los volantes de inercia se combinan en bancos de 10 o más conectados a las redes eléctricas, compensan las fluctuaciones entre oferta y demanda y operan con más suavidad. ¡Viva la inercia rotacional!

Mientras mayor sea la inercia rotacional de un objeto, mayor es la dificultad para cambiar su estado de rotación. Este hecho lo aprovecha un funámbulo de circo que lleva una larga pértiga para ayudarse a mantener el equilibrio. Mucha de la masa de la pértiga está lejos del eje de rotación, su punto medio. Por tanto, la pértiga tiene bastante inercia rotacional. Si el funámbulo comienza a trastabillar, un firme apretón a la

[3]Con frecuencia llamada *momento de inercia*.

pértiga la hace girar. Pero la inercia rotacional de la pértiga resiste, lo que da al funámbulo tiempo para reajustar su equilibrio. Cuanto más larga sea la pértiga, mejor para el equilibrio. Y mejor aún si en los extremos se colocan objetos masivos. Pero un funámbulo sin pértiga al menos puede extender los brazos para aumentar la inercia rotacional del cuerpo.

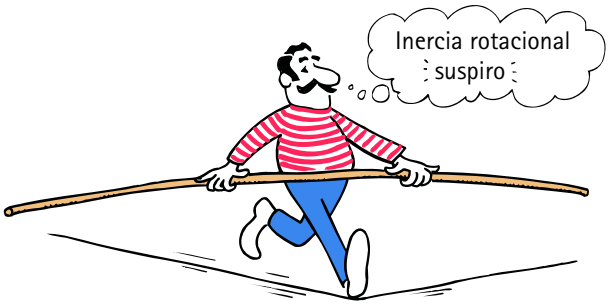



**FIGURA 8.10**
La tendencia de la pértiga a resistir la rotación ayuda al funámbulo.

La inercia rotacional de la pértiga, o de cualquier objeto, depende del eje en torno al cual gire.[4] Compara las diferentes rotaciones de un lápiz en la Figura 8.11. Considera tres ejes: uno en torno a su núcleo central paralelo a la longitud del lápiz, donde está el grafito; el segundo en torno al eje perpendicular del punto medio, y el tercero en torno a un eje perpendicular respecto de un extremo. La inercia rotacional es muy pequeña en torno a la primera posición (en torno al grafito); es fácil girar el lápiz entre las puntas de tus dedos porque casi toda la masa está muy cerca del eje. En torno al segundo eje, como el que usa el funámbulo de la ilustración anterior, la inercia rotacional es mayor. En torno al tercer eje, en el extremo del lápiz de modo que se balancee como un péndulo, la inercia rotacional es todavía mayor.

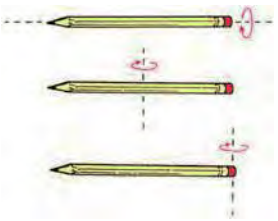


**FIGURA 8.11**
El lápiz tiene diferentes inercias rotacionales en torno a diferentes ejes de rotación.

Un bate de béisbol largo sostenido cerca de su extremo angosto tiene más inercia rotacional que un bate corto. Una vez que se balancea el bate largo, tiene mayor tendencia a seguir balanceándose, pero es más difícil que adquiera rapidez. Un bate corto, con menos inercia rotacional, es más fácil de balancear, lo que explica por qué los jugadores de béisbol en ocasiones "estrangulan" un bate al asirlo más cerca del extremo más masivo. De igual modo, cuando doblas las piernas para correr, reduces su inercia rotacional de modo que puedes girarlas de ida y vuelta más rápidamente. Una persona de piernas largas tiende a caminar con zancadas más lentas que una persona con piernas cortas. La diferencia en las zancadas de criaturas con distintas longitudes de patas es muy evidente en los animales. Jirafas, caballos y avestruces corren con pasos más lentos que los perros salchicha, los ratones y los bichos.

**FIGURA 8.12**
Cuando corres, doblas las piernas para reducir la inercia rotacional.

Debido a la inercia rotacional, un cilindro sólido que parte del reposo rodará por un plano inclinado más rápido que un aro. Ambos giran en torno a un eje central, y es el aro el que tiene la forma con la mayor parte de su masa lejos de su eje. De modo que, por su peso, un aro tiene mayor inercia rotacional y es más difícil de echar a rodar. Cualquier cilindro sólido superará en rodamiento a cualquier aro sobre el mismo plano

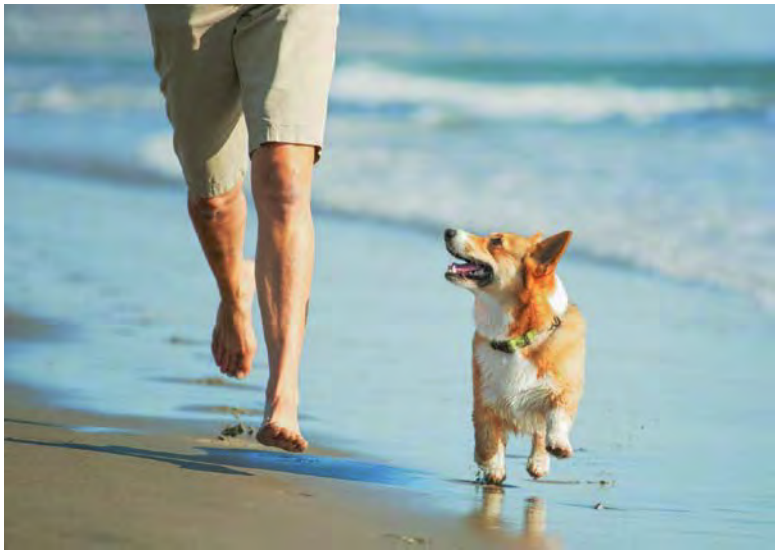


**FIGURA 8.13**
Las patas cortas tienen menos inercia rotacional que las patas largas. Un animal con patas cortas tiene una zancada más rápida que las personas con piernas largas, tal como un bateador de béisbol puede abanicar un bate corto más rápidamente que uno largo.

**VIDEO: Inercia rotacional cuando se usan tubos con pesos**

[4]Cuando la masa de un objeto está concentrada en el radio $r$ respecto del eje de rotación (como en el caso de una lenteja de péndulo simple o un anillo delgado), la inercia rotacional $I$ es igual a la masa $m$ multiplicada por el cuadrado de la distancia radial. Para este caso especial, $I = mr^2$.

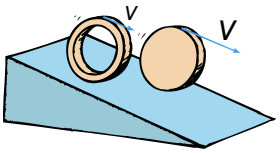



**FIGURA 8.14**
Un cilindro sólido rueda hacia abajo por un plano inclinado más rápido que un aro, ya sea que tengan o no la misma masa o diámetro exterior. Un aro tiene mayor inercia rotacional en relación con su masa que un cilindro.

**FIGURA 8.15**
Inercias rotacionales de varios objetos, cada uno de masa $m$, en torno a los ejes indicados.

**VIDEO: Inercia rotacional cuando se usa un martillo**

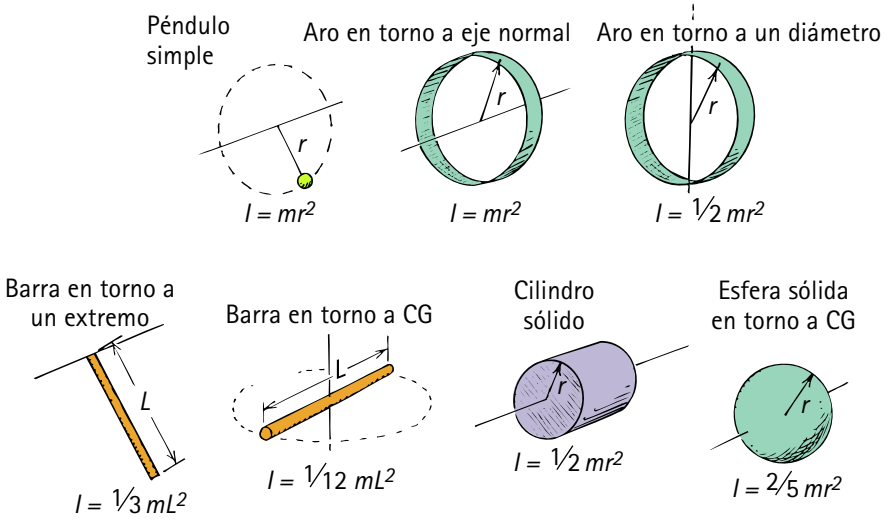
**FIGURA 8.16**
Sanjay Rebello agrega a la Figura 8.15 la inercia rotacional $I = \frac{2}{3}mr^2$ para una esfera hueca con pared delgada.

**VIDEO: Inercia rotacional con una barra con pesos**

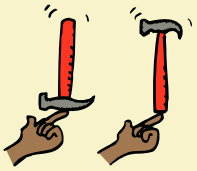
Observa cómo la inercia rotacional depende muchísimo de la posición del eje de rotación. Una barra que gira en torno a un extremo, por ejemplo, tiene cuatro veces más inercia rotacional que una barra que gira en torno a su centro.

inclinado. Esto no parece factible al principio, pero recuerda que cualesquiera dos objetos, sin importar la masa, caerán juntos cuando se suelten. También se deslizarán juntos cuando se suelten sobre un plano inclinado. Cuando se introduce la rotación, el objeto con mayor inercia rotacional *en relación con su propia masa* tiene la mayor resistencia a un cambio de movimiento. Por tanto, cualquier cilindro sólido rodará por cualquier plano inclinado con mayor aceleración que cualquier cilindro hueco, sin importar la masa o el radio. Un cilindro hueco tiene más "pereza por unidad de masa" que un cilindro sólido. ¡Inténtalo y verás!

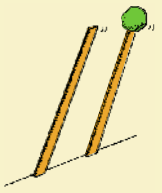
En la Figura 8.15 se comparan las inercias rotacionales de objetos con formas y ejes variados. No es importante que aprendas las ecuaciones que se muestran en la figura, ¿pero puedes ver cómo varían con la forma y el eje?




## PUNTO DE CONTROL



1. **Imagina que balanceas un martillo en posición vertical sobre la punta de tu dedo. Seguramente la cabeza es más pesada que el mango. ¿Es más fácil equilibrarlo con el extremo del mango en la punta de tu dedo, de modo que la cabeza esté arriba, o al revés?**



2. **Piensa en un par de reglas de un metro casi rectas contra la pared. Si las sueltas, girarán hacia el suelo al mismo tiempo. ¿Pero si una tiene un trozo masivo de arcilla pegado en el extremo superior? ¿Girará hacia el suelo en un tiempo más largo o más corto?**
3. **Sólo por diversión, y dado que se están estudiando cosas redondas, ¿por qué las tapas de las alcantarillas tienen forma circular?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sostén el martillo con el mango en la punta de tu dedo y la cabeza arriba. ¿Por qué? Porque de esta forma tendrá más inercia rotacional y será más resistente a un cambio rotacional. (Inténtalo tú mismo; trata de equilibrar una cuchara de ambas formas sobre la punta de tu dedo.) Los acróbatas que equilibran una larga pértiga vertical tienen una labor más sencilla cuando sus amigos están en la parte superior de la pértiga. ¡Una pértiga vacía en la parte superior tiene menos inercia rotacional y es más difícil de equilibrar!
2. ¡Inténtalo y ve! (Si no tienes arcilla, piensa en algo parecido.)
3. No te vayas tan rápido con esta pregunta. Piénsalo un poco. Si no encuentras la respuesta, *entonces* busca la respuesta al final del capítulo.

## 8.3 Momento de torsión

Sostén con la mano el extremo de un metro en sentido horizontal. Cuelga un peso de él cerca de tu mano y podrás sentir que la barra gira. Ahora desliza el peso más lejos de tu mano y podrás sentir más giro, aun cuando el peso sea el mismo. La fuerza que actúa sobre tu mano es la misma. Lo que cambia es el *momento de torsión*.

Momento de torsión (también llamado *torca* o *momento de fuerza*) es la contraparte rotacional de la fuerza. Las fuerzas tienden a cambiar el movimiento de las cosas; los momentos de torsión tienden a girar o cambiar el movimiento rotacional de las cosas. Si quieres que un objeto estacionario se mueva o que un objeto en movimiento cambie su velocidad, aplica una fuerza. Si quieres que un objeto estacionario gire o que un objeto en rotación cambie su velocidad rotacional, aplica un momento de torsión.

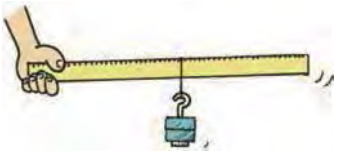


**FIGURA 8.17**
Aleja el peso de tu mano y siente la diferencia entre fuerza y momento de torsión.

Así como la inercia rotacional difiere de la inercia regular, el momento de torsión difiere de la fuerza. Tanto la inercia rotacional como el momento de torsión tienen que ver con la distancia respecto del eje de rotación. En el caso del momento de torsión, esta distancia, que proporciona apalancamiento, se llama *brazo de palanca.* Es la distancia más corta entre la fuerza aplicada y el eje de rotación. El **momento de torsión** se define como el producto de este brazo de palanca y la fuerza que tiende a producir rotación:

$$\text{Momento de torsión} = \text{brazo de palanca} \times \text{fuerza}$$

Los momentos de torsión son intuitivamente familiares para los niños pequeños que juegan en un subibaja. Los niños pueden equilibrar un subibaja aun cuando sus pesos sean distintos. Al considerar únicamente al peso, éste no produce rotación (tampoco el momento de torsión) y los niños aprenden pronto que la distancia a la que se sientan respecto del punto pivote es tan importante como sus pesos. El momento de torsión producido por el niño que está a la derecha en la Figura 8.18 tiende a producir rotación en el sentido de las manecillas del reloj, en tanto que el momento de torsión producido por la niña a la izquierda tiende a producir rotación contra las manecillas del reloj. Si los momentos de torsión son iguales, y esto hace que el momento de torsión neto sea cero, no se produce rotación.

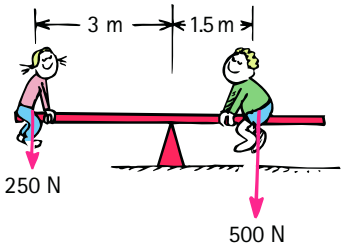



**FIGURA 8.18**
No se produce rotación cuando los momentos de torsión se equilibran entre sí.

Supón que el subibaja se configura de modo que la niña con la mitad de peso se suspende de una soga de 4 m que cuelga de su extremo del subibaja (Figura 8.19). Ahora ella está a 5 m del fulcro, y el subibaja sigue equilibrado. Se observa que la distancia del brazo de palanca todavía es de 3 m y no de 5 m. El brazo de palanca en torno a cualquier eje de rotación es la distancia perpendicular desde el eje hasta la línea a lo largo de la cual actúa la fuerza. Ésta siempre será la distancia más corta entre el eje de rotación y la línea a lo largo de la cual actúa la fuerza.

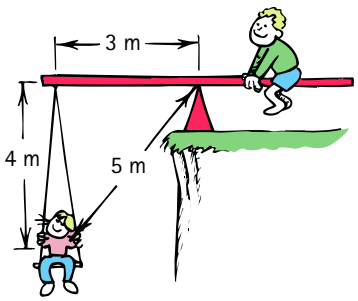



**FIGURA 8.19**
El brazo de palanca todavía es 3 m.

Es por esto que es más probable que el terco tornillo que se muestra en la Figura 8.20 gire cuando la fuerza aplicada sea perpendicular a la llave, que cuando esté a un ángulo oblicuo como se muestra en la primera figura. En la primera figura, el brazo de palanca se muestra con la línea punteada y es más corto que la longitud del mango de la llave. En la segunda figura, el brazo de palanca tiene la misma longitud que el mango de la llave. En la tercera figura, el brazo de palanca se extiende con un pedazo de tubo para proporcionar más apalancamiento y un mayor momento de torsión.

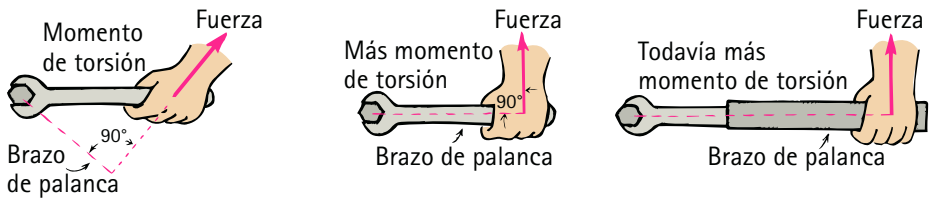



**FIGURA 8.20**
Aunque las magnitudes de las fuerzas son iguales en cada caso, los momentos de torsión son diferentes.

**SCREENCAST: Momento de torsión**

Cuando todos los relojes sean digitales, si eso sucede, ¿tendrán significado las expresiones *"en el sentido de las manecillas del reloj"* y *"contra las manecillas del reloj"*?

**VIDEO:** Diferencia entre momento de torsión y peso

**VIDEO:** Por qué una bola rueda colina abajo

**SCREENCAST:** Momentos de torsión en equilibrio

**SCREENCAST:** Momentos de torsión sobre un tablón

**SCREENCAST:** Momentos de torsión en patineta

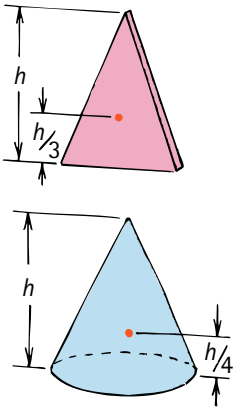



**FIGURA 8.22**
El centro de masa para cada objeto se muestra con el punto rojo.

Recuerda la regla de equilibrio del Capítulo 2: que la suma de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo o cualquier sistema debe ser igual a cero para el equilibrio mecánico; esto es, $\Sigma F = 0$. Ahora se ve una condición más. El *momento de torsión neto* sobre un cuerpo o un sistema también debe ser cero para el equilibrio mecánico: $\Sigma\tau = 0$ donde $\tau$ (la letra griega minúscula tau) representa el momento de torsión. Nada que esté en equilibrio mecánico acelera lineal o rotacionalmente.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Si un tubo extiende de un modo eficaz el mango de una llave a tres veces su longitud, ¿en cuánto aumentará el momento de torsión para la misma fuerza aplicada?**
2. **Piensa en el subibaja equilibrado de la Figura 8.18. Imagina que la niña de la izquierda súbitamente adquiere 50 N, como sucedería si, por ejemplo, le entregaras una bolsa de manzanas. ¿Dónde deberá sentarse con la finalidad de estar en equilibrio, si supones que el niño más pesado no se mueve?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Tres veces más apalancamiento para la misma fuerza produce tres veces más momento de torsión. (Cuidado: ¡Este método de aumentar el momento de torsión a veces resulta en el rompimiento del tornillo!)
2. Debe sentarse ½ m más cerca del centro. Entonces su brazo de palanca es 2.5 m. Esto concuerda: 300 N × 2.5 m = 500 N × 1.5 m.

## 8.4 Centro de masa y centro de gravedad

Lanza una pelota de béisbol al aire y seguirá una trayectoria parabólica suave. Lanza un bate de béisbol que gira en el aire y su trayectoria no es suave; su movimiento es bamboleante y parece bambolearse todo el camino. Pero, de hecho, se bambolea en torno a un lugar muy especial, un punto llamado **centro de masa (CM)**.

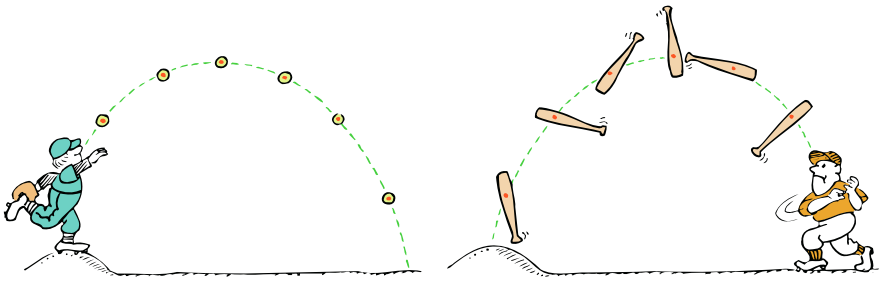


**FIGURA 8.21**
El centro de masa de la pelota de béisbol y el del bate siguen trayectorias parabólicas.

Para un cuerpo dado, el centro de masa es la posición promedio de toda la masa que constituye al objeto. Por ejemplo, un objeto simétrico, como una pelota, tiene su centro de masa en su centro geométrico; por el contrario, un cuerpo con forma irregular, como un bate de béisbol, tiene más de su masa hacia un extremo. Por tanto, el centro de masa de un bate de béisbol está hacia el extremo más grueso. Un cono sólido tiene su centro de masa exactamente a un cuarto de su base.

**Centro de gravedad (CG)** es un término que se usa popularmente para expresar el centro de masa. El centro de gravedad es simplemente la posición promedio de la distribución del peso. Dado que peso y masa son proporcionales, centro de gravedad y centro

de masa se refieren al mismo punto de un objeto.[5] Los físicos prefieren usar el término *centro de masa* porque un objeto tiene un centro de masa ya sea que esté o no bajo la influencia de la gravedad. Sin embargo, aquí se usarán ambos términos para este concepto, y se favorecerá el término *centro de gravedad* cuando el peso sea parte de la situación.

La fotografía estroboscópica de la Figura 8.23 muestra una vista superior de una llave que se desliza por una superficie horizontal lisa. Observa que su centro de masa, indicado por el punto blanco, sigue una trayectoria en línea recta, en tanto que otras partes de la llave se bambolean cuando se mueven por la superficie. Dado que no hay una fuerza externa que actúe sobre la llave, su centro de masa se mueve distancias iguales en intervalos de tiempo iguales. El movimiento de la llave giratoria es la combinación del movimiento en línea recta de su centro de masa y el movimiento rotacional en torno a su centro de masa.

**FIGURA 8.23**
El centro de masa de la llave giratoria sigue una trayectoria en línea recta.

Si en vez de ello la llave se lanzara al aire, sin importar cómo gire, su centro de masa (o centro de gravedad) seguiría un arco parabólico liso. Lo mismo sucede con una bala de cañón que explota (Figura 8.24). Las fuerzas internas que actúan en la explosión no cambian el centro de gravedad del proyectil. Es muy interesante que, si la resistencia del aire puede despreciarse, el centro de gravedad de los fragmentos dispersos conforme vuelan por el aire estará en la misma posición que tendría el centro de gravedad de la bala de cañón si la explosión no hubiera ocurrido.

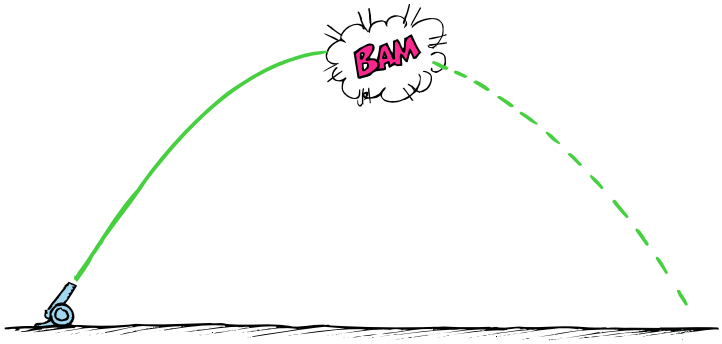



**FIGURA 8.24**
El centro de masa de la bala de cañón y sus fragmentos se mueven a lo largo de la misma trayectoria antes y después de la explosión.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Dónde está el CG de una dona?**
2. **¿Un objeto puede tener más de un CG?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. ¡En el centro del agujero!
2. No. Un objeto rígido tiene un CG. Si no es rígido, como un trozo de arcilla o masilla, y se distorsiona en diferentes formas, entonces su CG puede cambiar con su forma. Incluso entonces, tiene un CG para cualquier forma dada.

[5]Para casi todos los objetos sobre y cerca de la superficie de la Tierra, dichos términos son indistintos. Puede haber una pequeña diferencia entre centro de gravedad y centro de masa en el caso de un objeto suficientemente grande como para que la gravedad varíe de una parte a otra. Por ejemplo, el centro de gravedad del edificio Empire State está aproximadamente 1 milímetro abajo de su centro de masa. Esto se debe a que los pisos más bajos son jalados con un poco más de fuerza por la gravedad de la Tierra que los pisos superiores. En el caso de los objetos cotidianos (incluidos edificios altos), puedes usar los términos *centro de gravedad* y *centro de masa* de manera indistinta.

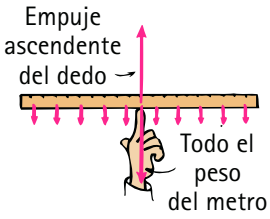



**FIGURA 8.25**
El peso de todo el metro se comporta como si estuviera concentrado en el centro del metro.

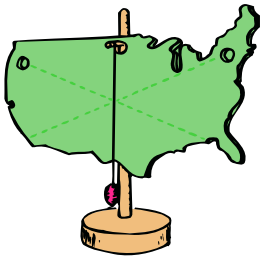


**FIGURA 8.26**
Cómo encontrar el centro de gravedad de un objeto con forma irregular.

**VIDEO: Aprende sobre el centro de gravedad**

**FIGURA 8.28**
El centro de masa puede estar afuera de la masa de un cuerpo.

## Ubicación del centro de gravedad

El centro de gravedad de un objeto uniforme, como un metro, está en su punto medio porque el metro actúa como si todo su peso estuviera concentrado ahí. Si sostienes ese solo punto, sostienes todo el metro. Equilibrar un objeto es un método sencillo de localizar su centro de gravedad. En la Figura 8.25, las muchas flechas pequeñas representan el tirón de la gravedad a lo largo de todo el metro. Todas las flechas pueden combinarse en una fuerza resultante que actúa a través del centro de gravedad. Puede considerarse que todo el peso del metro actúa en ese solo punto. Por tanto, para equilibrar el metro puedes aplicar una sola fuerza ascendente en una dirección que pase por este punto.

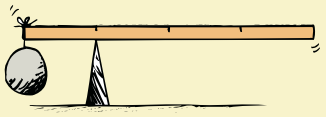
El centro de gravedad de cualquier objeto suspendido libremente se encuentra directamente abajo del punto de suspensión o en él (Figura 8.26). Si dibujas una línea vertical que cruce el punto de suspensión, el centro de gravedad se encuentra en alguna parte a lo largo de dicha línea. Para determinar exactamente dónde se encuentra a lo largo de la línea, sólo tienes que suspender el objeto de algún otro punto y dibujar una segunda línea vertical que cruce dicho punto de suspensión. El centro de gravedad se encuentra donde intersecan las dos líneas.

El centro de masa de un objeto puede ser un punto donde no exista masa. Por ejemplo, el centro de masa de un anillo o esfera hueca está en el centro geométrico donde no existe materia. De igual modo, el centro de masa de un *boomerang* está afuera de la estructura física, no dentro del material del *boomerang* (Figura 8.28).

**FIGURA 8.27**
El atleta ejecuta un "salto Fosbury" para librar la barra mientras su centro de gravedad pasa bajo la barra.

### PUNTO DE CONTROL

1. **¿Dónde está el centro de masa de la corteza de la Tierra?**
2. **Un metro uniforme sostenido en la marca de 25 cm se equilibra cuando una roca de 1 kg se suspende en el extremo de 0 cm. ¿Cuál es la masa del metro?**



### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Al igual que un balón gigante de básquetbol, la corteza de la Tierra es un cascarón esférico con su centro de masa en el centro de la Tierra.
2. La masa del metro es 1 kg. ¿Por qué? El sistema está en equilibrio, de modo que cualquier momento de torsión debe estar equilibrado: el momento de torsión producido por el peso de la roca se equilibra con el momento de torsión igual y con dirección opuesta producido por el peso del metro *aplicado en su CG, la marca de 50 cm.* La fuerza de soporte en la marca de 25 cm se aplica a medio camino entre la roca y el CG del metro, de modo que los brazos de palanca en torno al punto de soporte son iguales (25 cm). Esto significa que los pesos (y en consecuencia las masas) de la roca y el metro también son iguales. (Observa que no es necesario pasar por la laboriosa tarea de considerar las partes fraccionarias del peso del metro en ningún lado del fulcro, porque el CG de todo el metro realmente está en un punto, ¡la marca de 50 cm!) Es interesante que el CG del sistema roca + metro esté en la marca de 25 cm, directamente arriba del fulcro.

## Estabilidad

La ubicación del centro de gravedad es importante para la estabilidad, como lo muestran las Figuras 8.29-8.36. Si trazas una línea recta hacia abajo desde el centro de gravedad de un objeto con cualquier forma y cae dentro de la base del objeto, está en **equilibrio** estable; se equilibrará. Si la línea cae afuera de la base, el objeto es inestable. ¿Por qué no se viene abajo la famosa torre inclinada de Pisa? Como puedes ver en la Figura 8.29, una línea desde el centro de gravedad de la torre hasta el nivel del suelo cae dentro de su base, de modo que la torre inclinada ha estado de pie varios siglos. Si la torre se inclinara tanto que el centro de gravedad se extendiera fuera de la base, entonces un momento de torsión desbalanceado derribaría la torre.

Cuando te paras erguido (o te acuestas en el suelo), tu centro de gravedad está dentro de tu cuerpo. ¿Por qué el centro de gravedad es más bajo en una mujer promedio que en un hombre promedio de la misma estatura? ¿Tu centro de gravedad siempre está en el mismo punto de tu cuerpo? ¿Siempre está dentro de tu cuerpo? ¿Qué le ocurre cuando te inclinas hacia adelante?

Si eres bastante flexible, puedes inclinarte hacia adelante y tocarte los dedos de los pies sin doblar las rodillas. Por lo general, cuando te inclinas hacia adelante y te tocas los dedos de los pies, extiendes tus extremidades inferiores, como se muestra en el lado izquierdo de la Figura 8.31, de modo que tu centro de gravedad está arriba de una base de soporte: tus pies. Sin embargo, si intentas tocarte los dedos de los pies cuando te paras contra una pared, no puedes contrabalancearte y tu centro de gravedad pronto sale de tus pies, como se muestra en el lado derecho de la Figura 8.31.

**FIGURA 8.29**
El centro de gravedad de la torre inclinada de Pisa se encuentra arriba de su base de sostén, de modo que la torre está en equilibrio estable.

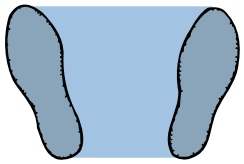


**FIGURA 8.30**
Cuando estás de pie, tu centro de gravedad está en alguna parte arriba del área de la base acotada por tus pies. ¿Por qué mantienes las piernas separadas cuando estás de pie en el pasillo de un autobús que viaja por un camino lleno de baches?

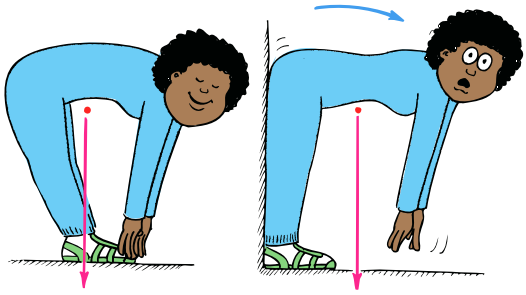


**FIGURA 8.31**
Tú puedes inclinarte hacia adelante y tocarte los dedos de los pies sin caer sólo si tu centro de gravedad está arriba del área acotada por tus pies.

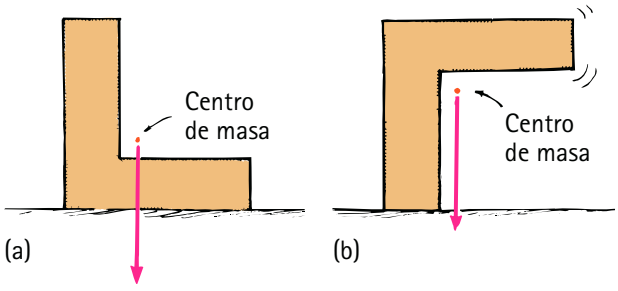
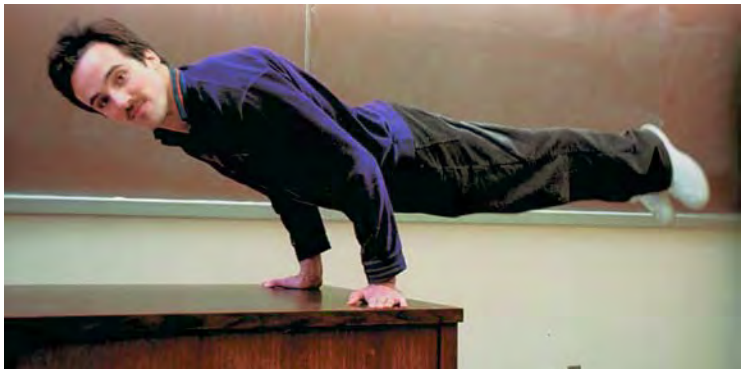



**FIGURA 8.32**
El centro de masa del objeto con forma de L se ubica donde no existe masa. (a) El centro de masa está arriba de la base de soporte, de modo que el objeto está estable. (b) El centro de masa no está arriba de la base de soporte, de modo que el objeto es inestable y caerá.



**VIDEO: Desplome**

**FIGURA 8.33**
¿Dónde está el centro de gravedad de Alexei en relación con sus manos?

Tú giras debido a un momento de torsión desbalanceado. Esto se demuestra en los dos objetos con forma de L de la Figura 8.34. Ambos son inestables y se desplomarán a menos que se sujeten a la superficie. Es fácil ver que, incluso cuando las dos formas tengan el mismo peso, la de la derecha es más inestable. Esto se debe a la mayor distancia del brazo de palanca y, en consecuencia, al mayor momento de torsión.

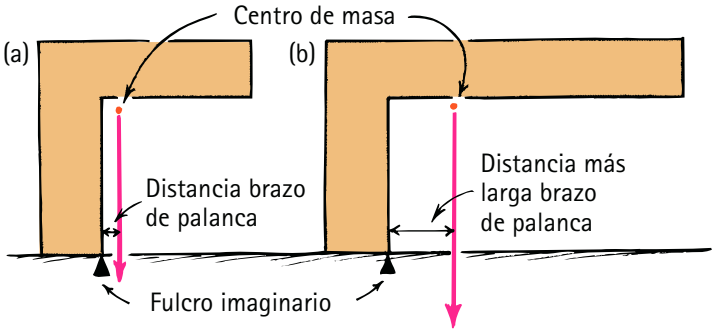



**FIGURA 8.34**
El momento de torsión más grande actúa sobre (b) por dos razones. ¿Cuáles son?

**FIGURA 8.35**
Giroscopios y motores asistidos por computadora realizan ajustes continuos en los vehículos eléctricos autoequilibrantes para mantener los CG combinados de Mark, Tenny y los vehículos arriba de la base con ruedas.

Intenta equilibrar el mango de una escoba en posición vertical sobre la palma de tu mano. La base de soporte es muy pequeña y está relativamente lejos, por debajo del centro de gravedad, de modo que es difícil mantenerlo en equilibrio durante mucho tiempo. Después de algo de práctica, puedes equilibrar la escoba si aprendes a realizar ligeros movimientos de tu mano para responder exactamente a las variaciones en equilibrio. Aprendes a evitar la respuesta deficiente o excesiva a las más ligeras variaciones en el equilibrio. El intrigante Segway Human Transporter (Figura 8.35) hace en gran parte lo mismo. Los giroscopios perciben rápidamente las variaciones en el equilibrio, y una computadora interna regula un motor para mantener el vehículo en posición vertical. La computadora regula ajustes correctivos de la rapidez de las ruedas en una forma muy similar a la manera en la que tu cerebro coordina tu acción correctiva cuando equilibras una larga pértiga sobre la palma de tu mano. Ambas hazañas son verdaderamente sorprendentes.

Para reducir la probabilidad de que se caigan, por lo general es aconsejable diseñar objetos con una base ancha y centro de gravedad bajo. Cuanto más ancha sea la base, más debe elevarse el centro de gravedad antes de que el objeto caiga.

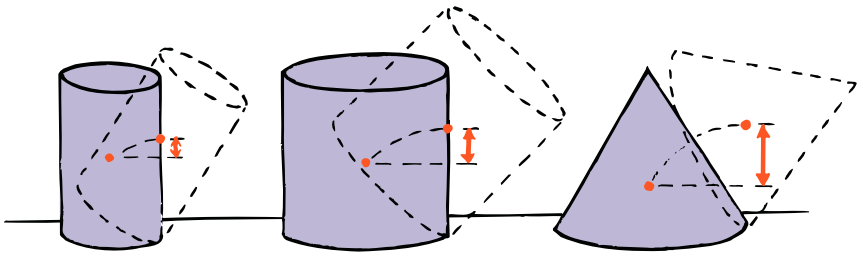
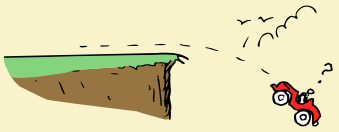


**FIGURA 8.36**
La estabilidad se determina por la distancia vertical que el centro de gravedad se eleva al inclinarse. Un objeto con una base ancha y un centro de gravedad bajo es más estable.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Por qué es peligroso dejar abiertos los cajones superiores de un archivero totalmente lleno que no está asegurado al suelo?**
2. **Cuando un automóvil salta por un risco, ¿por qué gira hacia adelante mientras cae?**



**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. El archivero lleno está en peligro de inclinarse porque el CG puede extenderse y salirse de la base de soporte. Si lo hace, entonces el momento de torsión debido a la gravedad inclina al archivero.
2. Cuando todas las ruedas están en el suelo, el CG del automóvil está encima de una base de soporte y no hay inclinación. Pero cuando el automóvil vuela por el risco, las ruedas frontales son las primeras en dejar el suelo y el automóvil queda sostenido sólo por las ruedas traseras. Entonces el CG se extiende y sale de la base de soporte y hay rotación. Es interesante que la rapidez del automóvil guarde relación con la cantidad de tiempo que el CG no está soportado y, en consecuencia, con la cantidad de rotación del automóvil mientras cae.

## 8.5 Fuerza centrípeta

Cualquier fuerza dirigida hacia un centro fijo se llama **fuerza centrípeta**. *Centrípeto* significa "que busca el centro" o "hacia el centro". Cuando haces girar una lata sujeta en el extremo de una cuerda, descubres que debes seguir tirando de la cuerda, lo que ejerce una fuerza centrípeta (Figura 8.37). La cuerda transmite la fuerza centrípeta, que pone a la lata en una trayectoria circular. Las fuerzas gravitacional y eléctrica pueden producir fuerzas centrípetas. La Luna, por ejemplo, se mantiene en una órbita casi circular por la fuerza gravitacional dirigida hacia el centro de la Tierra. Los electrones que orbitan en los átomos experimentan una fuerza eléctrica hacia los núcleos centrales. Cualquier cosa que se mueva en una trayectoria circular lo hace porque sobre ella actúa una fuerza centrípeta.

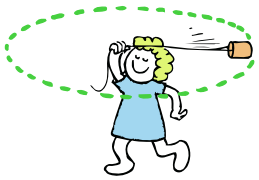


**FIGURA 8.37**
La fuerza que se ejerce sobre la lata que gira es hacia el centro.

La fuerza centrípeta depende de la masa $m$, la rapidez tangencial $v$ y el radio de curvatura $r$ del objeto que se mueve circularmente. En el laboratorio, seguramente usarás la relación exacta

$$F = mv^2/r$$

Observa que la rapidez es al cuadrado, de modo que el doble de rapidez necesita cuatro veces la fuerza. La relación inversa con el radio de curvatura indica que la mitad de la distancia radial exige el doble de fuerza.

La fuerza centrípeta no es una fuerza básica de la naturaleza; es tan sólo el nombre dado a cualquier fuerza, ya sea tensión de cuerda, gravitacional, eléctrica, o cualquiera, que se dirige hacia un centro fijo. Si el movimiento es circular y se ejecuta con rapidez constante, esta fuerza está en ángulo recto con respecto a la trayectoria del objeto en movimiento.

**VIDEO: Fuerza centrípeta**

**SCREENCAST: Fuerza centrípeta**

Cuando un automóvil da vuelta en una esquina, la fricción entre las llantas y el camino proporciona la fuerza centrípeta que mantiene al automóvil en una trayectoria curva (Figura 8.39). Si esta fricción es insuficiente (porque hay aceite o grava sobre el

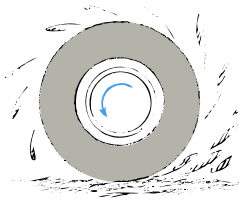


**FIGURA 8.38**
La fuerza centrípeta (adhesión de lodo sobre la llanta que gira) no es suficientemente grande para mantener el lodo sobre la llanta, de modo que sale disparado en líneas tangentes rectas.

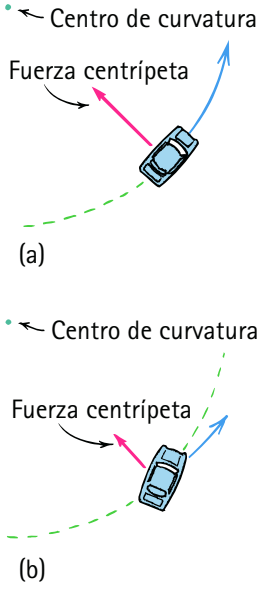



**FIGURA 8.39**
(a) Cuando un automóvil negocia una curva, debe haber una fuerza que empuje al automóvil hacia el centro de la curva. (b) Un automóvil derrapa en una curva cuando la fuerza centrípeta (fricción del camino sobre las llantas) no es suficientemente grande.

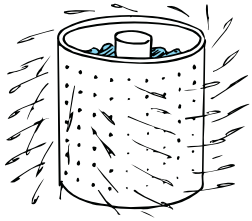


**FIGURA 8.41**
Las ropas son forzadas a seguir una trayectoria circular, pero eso no ocurre con el agua.

pavimento, por ejemplo), las llantas se deslizan hacia los lados y el automóvil no logra hacer la curva; el automóvil tiende a derraparse tangencialmente fuera del camino.

La fuerza centrípeta realiza la tarea principal en el funcionamiento de una centrífuga. Un ejemplo familiar es la tina giratoria de una lavadora automática (Figura 8.41). En su ciclo de giro, la tina gira con gran rapidez y produce una fuerza centrípeta sobre la ropa húmeda, que es forzada en una trayectoria circular por la pared interna de la tina. La tina ejerce gran fuerza sobre la ropa, pero los orificios de la tina impiden que se ejerza la misma fuerza sobre el agua en la ropa. El agua escapa tangencialmente por los agujeros. Estrictamente hablando, la ropa es obligada a alejarse del agua; el agua no es obligada a alejarse de la ropa. Piénsalo.

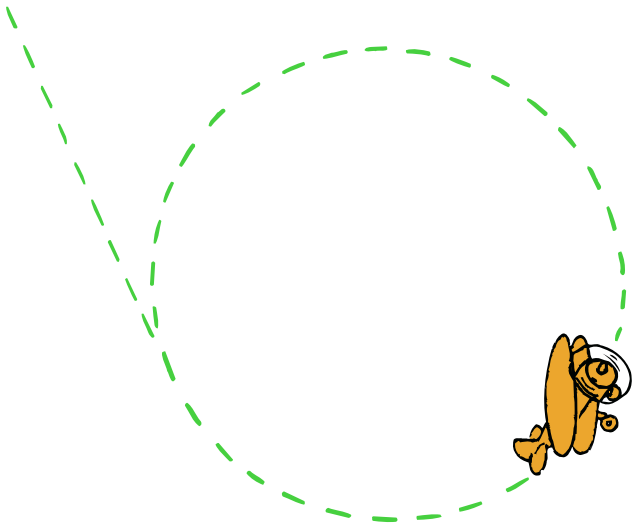


**FIGURA 8.40**
Grandes fuerzas centrípetas sobre las alas de un avión le permiten volar en bucles circulares. La aceleración lejos de la trayectoria en línea recta que seguiría el avión en ausencia de fuerza centrípeta con frecuencia es muchas veces mayor que la aceleración debida a la gravedad, *g*. Por ejemplo, si la aceleración centrípeta es 50 m/s$^2$ (cinco veces mayor que 10 m/s$^2$), se dice que el avión experimenta 5 *g*. Para un piloto, el número de *g* se define por la fuerza sobre el asiento. De modo que en el fondo del bucle, donde el peso del piloto se alinea con la fuerza centrípeta, el piloto experimenta 6 *g*. Los aviones de combate típicos están diseñados para soportar aceleraciones de hasta 8 o 9 *g*. Tanto el piloto como el avión deben soportar esta cantidad de aceleración. Los pilotos de aviones de combate usan trajes de presión para evitar que la sangre vaya de la cabeza a los pies, lo que podría provocar un desmayo.

## PRACTICANDO LA FÍSICA: BALANCEO DE CUBETA CON AGUA

Llena a la mitad una cubeta con agua y balancéala en un círculo vertical, como demuestra Marshall Ellenstein. La cubeta y el agua aceleran hacia el centro de tu balanceo. Si balanceas la cubeta suficientemente rápido, el agua no caerá cuando esté arriba. Es interesante que, aunque el agua no *saldrá,* todavía caerá. El truco es balancear la cubeta suficientemente rápido de modo que la cubeta caiga tan rápido como cae el agua dentro de la cubeta. ¿Puedes ver que, debido a que la cubeta va en círculos, el agua se mueve tangencialmente y permanece en la cubeta? En el Capítulo 10 aprenderás que un transbordador espacial en órbita cae igualmente mientras orbita. El truco es impartir suficiente velocidad tangencial al transbordador de modo que caiga alrededor de la Tierra curva en lugar de hacia ella.

## 8.6 Fuerza centrífuga

Aunque la fuerza centrípeta se dirige hacia el centro, un ocupante dentro de un sistema en rotación parece experimentar una fuerza hacia afuera. Esta aparente fuerza hacia afuera se llama **fuerza centrífuga**. *Centrífugo* significa "huir del centro" o "alejarse del centro". En el caso de la lata que gira en el extremo de una cuerda, es una mala interpretación frecuente creer que una fuerza centrífuga tira hacia afuera sobre la lata. Si la cuerda que mantiene el giro se rompe (Figura 8.42), la lata no se mueve radialmente hacia adentro, sino que sale en una trayectoria en línea recta tangente, porque *no* actúa fuerza sobre ella. Esto se ilustra con otro ejemplo.

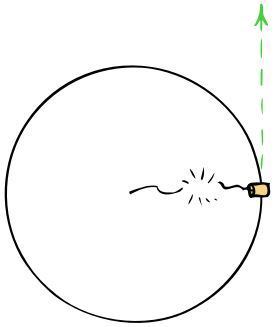


**FIGURA 8.42**
Cuando la cuerda se rompe, la lata giratoria se mueve en una línea recta, tangente al centro de su trayectoria circular, no hacia afuera de él.

Supón que eres pasajero en un automóvil que súbitamente se detiene. Te proyectas hacia adelante, hacia el tablero. Cuando esto ocurre no dices que algo te forzó hacia adelante. De acuerdo con la ley de la inercia, te proyectas hacia adelante debido a la ausencia de una fuerza, que habría proporcionado el cinturón de seguridad. De igual modo, si estás en un automóvil que negocia una curva cerrada hacia la izquierda, tiendes a proyectarte hacia afuera hacia la derecha, no debido a alguna fuerza hacia afuera o centrífuga, sino debido a que no hay fuerza centrípeta que te sostenga en movimiento circular (de nuevo, el propósito del cinturón de seguridad). La idea de que una fuerza centrífuga te dispara contra la puerta del automóvil es una mala interpretación. (Claro, empujas contra la puerta, pero sólo porque la puerta empuja sobre ti: tercera ley de Newton.)

**SCREENCAST: Fuerza centrífuga**

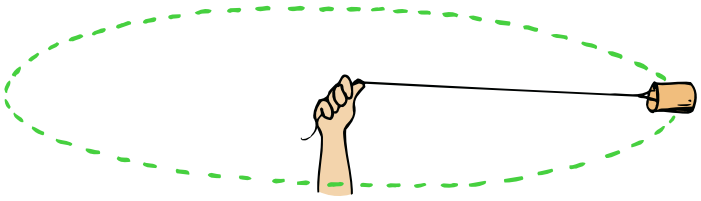


**FIGURA 8.43**
La única fuerza que se ejerce sobre la lata giratoria (si desprecias la gravedad) se dirige *hacia* el centro del movimiento circular. Ésta es una fuerza centrípeta. Ninguna fuerza *hacia afuera* actúa sobre la lata.

Del mismo modo, cuando balanceas una lata en una trayectoria circular, ninguna fuerza tira de la lata hacia afuera: la única fuerza sobre la lata es la cuerda que tira hacia adentro. No hay fuerza hacia afuera sobre la lata. Ahora supón que hay una mariquita dentro de la lata giratoria (Figura 8.44). La lata presiona contra los pies del bicho y proporciona la fuerza centrípeta que la mantiene en una trayectoria circular. Desde tu marco de referencia estacionario exterior, no ves fuerza centrífuga ejercida sobre la mariquita, tal como ninguna fuerza centrífuga te dispara contra la puerta del automóvil. El efecto de fuerza centrífuga es causado no por una fuerza real, sino por la inercia: la tendencia del objeto en movimiento a seguir una trayectoria en línea recta. ¡Pero trata de decirle eso a la mariquita!

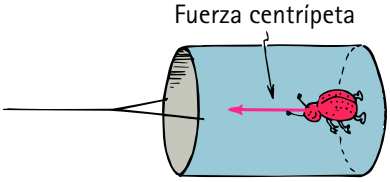



**FIGURA 8.44**
La lata proporciona la fuerza centrípeta necesaria para mantener a la mariquita en una trayectoria circular.

### Fuerza centrífuga en un marco de referencia en rotación

Si permaneces en reposo y observas que alguien da vueltas a una lata sobre su cabeza en un círculo horizontal, ves que la fuerza sobre la lata es centrípeta, tal como lo es sobre una mariquita dentro de la lata. El fondo de la lata ejerce una fuerza sobre los pies de la mariquita. Si desprecias la gravedad, ninguna otra fuerza actúa sobre la mariquita. Pero, visto desde el interior del marco de referencia de la lata giratoria, las cosas parecen muy diferentes.[6]

*En el marco de referencia en rotación de la mariquita,* además de la fuerza de la lata sobre los pies de la mariquita, hay una aparente fuerza centrífuga que se ejerce sobre la mariquita. La fuerza centrífuga *en un marco de referencia en rotación* es una fuerza por derecho propio, tan real como el jalón de la gravedad. Sin embargo, hay una diferencia

[6]Un marco de referencia en el que un cuerpo libre no muestre aceleración se llama marco de referencia *inercial*. En un marco de referencia inercial se ve que las leyes de Newton se sostienen con exactitud. Un marco de referencia en rotación, por el contrario, es un marco de referencia acelerado. Las leyes de Newton no son válidas en un marco de referencia acelerado.

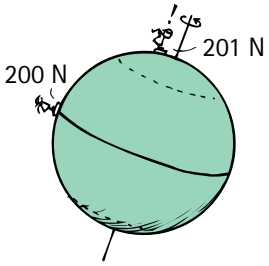



**FIGURA 8.45**
En el marco de referencia de la Tierra que gira, experimentas una fuerza centrífuga que disminuye un poco tu peso. Al igual que un caballo exterior en un tiovivo, tienes la mayor rapidez tangencial cuando estás más lejos del eje de la Tierra, en el ecuador. Por tanto, la fuerza centrífuga es máxima cuando estás en el ecuador y cero en los polos, donde no tienes rapidez tangencial. De modo que, estrictamente hablando, si quieres perder peso, ¡camina hacia el ecuador!

fundamental. La fuerza gravitacional es una interacción entre una masa y otra. La gravedad que experimentas es tu interacción con la Tierra. Pero para la fuerza centrífuga en el marco en rotación, no existe tal agente: no hay contraparte de interacción. La fuerza centrífuga *se siente* como la gravedad, pero *no hay algo* que jale. Nada produce el jalón; en vez de ello, la fuerza que sientes es resultado de la rotación. No hay contraparte que jale. Por esta razón, los físicos la llaman fuerza "inercial" (o en ocasiones fuerza *ficticia*): una fuerza *aparente*, y no una fuerza real como la gravedad, las fuerzas electromagnéticas y las fuerzas nucleares. No obstante, para los observadores que están en un sistema en rotación, la fuerza centrífuga se siente como, y se interpreta que es, una fuerza muy real. Así como la gravedad siempre está presente en la superficie de la Tierra, la fuerza centrífuga siempre está presente en un sistema en rotación.

**PUNTO DE CONTROL**

**Una pesada bola de hierro se ata con un resorte a una plataforma giratoria, como se muestra en el dibujo. Dos observadores, uno en el marco en rotación y uno sobre el suelo en reposo, observan su movimiento. ¿Cuál observador ve que la bola se jala hacia afuera y estira el resorte? ¿Cuál ve que el resorte jala a la bola en movimiento circular?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

El observador en el marco de referencia de la plataforma giratoria afirma que una fuerza centrífuga jala radialmente hacia afuera sobre la bola, lo que estira el resorte. El observador en el marco en reposo afirma que una fuerza centrípeta suministrada por el resorte estirado jala de la bola en un movimiento circular. Sólo el observador en el marco en reposo puede identificar un par de fuerzas acción-reacción; donde la acción es el resorte sobre la bola, la reacción es la bola sobre el resorte. El observador en rotación no puede identificar una contraparte de reacción para la fuerza centrífuga, ¡porque no la hay!

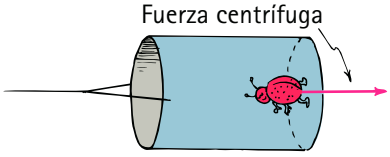



**FIGURA 8.46**
Desde el marco de referencia de la mariquita dentro de la lata giratoria, se mantiene en el fondo de la lata por una fuerza que se aleja del centro del movimiento circular. La mariquita llama a esta fuerza hacia afuera una fuerza *centrífuga*, que es tan real para ella como la gravedad.

## Gravedad simulada

Piensa en una colonia de mariquitas que viven dentro de una llanta de bicicleta: un neumático con mucho espacio interior. Si lanzas la llanta de bicicleta al aire o la sueltas desde un avión alto en el cielo, las mariquitas estarán en una condición de ingravidez. Flotarán libremente mientras la rueda esté en caída libre. Ahora haz girar la rueda. Las mariquitas se sentirán presionadas hacia la parte exterior de la superficie interior del neumático. Si la rueda gira justo a la rapidez correcta, las mariquitas experimentarán *gravedad simulada* que sentirán como la gravedad a la que están acostumbradas. La gravedad se simula mediante una fuerza centrífuga. La dirección "abajo" para las mariquitas será lo que llamarías radialmente hacia afuera, alejándose del centro de la rueda.

En la actualidad, los seres humanos viven en la superficie exterior de este plantea esférico y se mantienen ahí por la gravedad. El planeta ha sido la cuna de la humanidad.

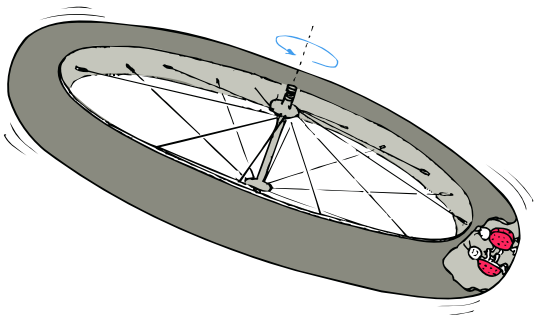


**FIGURA 8.47**
Si la rueda que gira cae libremente, las mariquitas en el interior experimentarán una fuerza centrífuga que sentirán como gravedad cuando la rueda gire al ritmo adecuado. Para los ocupantes, la dirección "arriba" es hacia el centro de la rueda y "abajo" es radialmente hacia afuera.

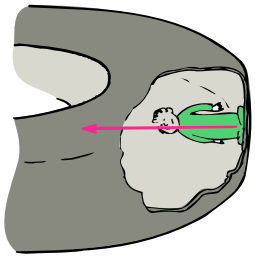


**FIGURA 8.48**
La interacción entre el hombre y el suelo, vista desde un marco de referencia estacionario afuera del sistema en rotación. El suelo presiona contra el hombre (acción) y el hombre presiona de vuelta sobre el suelo (reacción). La única fuerza ejercida sobre el hombre es la del suelo. Se dirige hacia el centro y es una fuerza centrípeta.

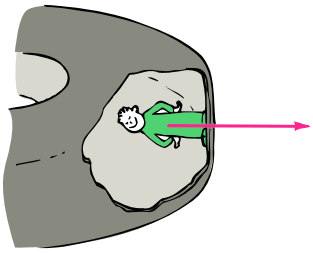


**FIGURA 8.49**
Visto desde el interior del sistema en rotación, además de la interacción hombre-suelo, hay una fuerza centrífuga ejercida sobre el hombre en su centro de masa. Parece tan real como la gravedad. Sin embargo, a diferencia de la gravedad, no tiene contraparte de reacción: no hay nada afuera sobre lo que pueda jalar. La fuerza centrífuga no es parte de una interacción, sino una consecuencia de la rotación. Por tanto, se le llama fuerza aparente o *fuerza ficticia*.

Pero no lo será siempre. El ser humano se está volviendo gente de vuelos espaciales. Los ocupantes de los vehículos espaciales de hoy sienten ingravidez porque no experimentan *fuerza de soporte*. No son presionados contra un suelo de soporte por la gravedad, ni experimentan una fuerza centrífuga debida a un giro. Durante periodos prolongados, esto puede causar pérdida de fuerza muscular y daños en el cuerpo, como la pérdida de calcio de los huesos. Pero los futuros viajeros espaciales no necesitarán estar sujetos a ingravidez. Sus hábitats espaciales probablemente girarán, como la rueda giratoria de las mariquitas, lo que efectivamente proporcionará una fuerza de soporte y simulará muy bien la gravedad.

La significativamente más pequeña Estación Espacial Internacional no gira. Por tanto, los miembros de su tripulación deben adaptarse a vivir en un ambiente de ingravidez. Los hábitats giratorios pueden venir más adelante, acaso en enormes estructuras que giren lentamente donde los ocupantes se mantendrán en las superficies interiores mediante una fuerza centrífuga. Tal hábitat giratorio proporciona una gravedad simulada de modo que el cuerpo humano pueda funcionar con normalidad. Las estructuras de diámetro pequeño tendrían que girar a altas rapideces para proporcionar una aceleración gravitacional simulada de 1 *g*. Hay pequeños órganos sensibles y delicados en el oído interno que sienten la rotación. Aunque parece no haber dificultad en una sola revolución por minuto (RPM) o algo así, muchas personas encuentran difícil adaptarse a rapideces mayores a 2 o 3 RPM (aunque algunas se adaptan con facilidad a 10 o más RPM). Para simular una gravedad terrestre normal a 1 RPM es indispensable una estructura muy grande, de aproximadamente 2 km de diámetro. La aceleración centrífuga es directamente proporcional a la distancia radial desde el centro, de modo que son posibles varios estados *g*. Si la estructura gira de modo que los habitantes en el interior del borde exterior experimenten 1 *g*, entonces a la mitad del camino hacia el eje experimentarían 0.5 *g*. En el eje en sí experimentarían ingravidez (0 *g*). La variedad de fracciones de *g* posibles desde el borde de un hábitat espacial giratorio promete un ambiente diferente y (al momento de escribir esto) todavía no experimentado. En esta estructura todavía bastante hipotética, podría bailarse ballet a 0.5 *g*, hacer clavados y acrobacias a 0.2 *g* y en estados de menor *g*, y jugar *soccer* tridimensional (y nuevos deportes todavía no concebidos) en estados *g* muy bajos.

Un hábitat giratorio no necesita ser una rueda enorme. La gravedad podría simularse en un par de cápsulas que den vueltas conectadas con un largo cable.

**VIDEO: Gravedad simulada**

**PUNTO DE CONTROL**

**Si la Tierra tuviera que girar más rápido en torno a su eje, tu peso sería menor. Si estuvieras en un hábitat espacial en rotación que aumentara su tasa de giro, "pesarías" más. Explica por qué mayores tasas de giro producen efectos opuestos en estos casos.**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Tú estás en el *exterior* de la Tierra giratoria, pero estarías en el *interior* de un hábitat espacial giratorio. Una mayor tasa de giro en el exterior de la Tierra tiende a *despegarte* de una báscula, lo que hace que se muestre una reducción en tu peso, pero te pega *contra* una báscula *dentro* del hábitat espacial, para así mostrar un aumento en tu peso.

## 8.7 Cantidad de movimiento angular

**SCREENCAST**: Cantidad de movimiento angular

Las cosas que giran, ya sea una colonia espacial, un cilindro que rueda por un plano inclinado o un acróbata que hace un salto mortal, siguen girando hasta que algo las detiene. Un objeto en rotación tiene una "inercia de rotación". Recuerda del Capítulo 6 que todos los objetos en movimiento tienen "inercia de movimiento" o *cantidad de movimiento*: el producto de masa y velocidad. Este tipo de cantidad de movimiento es **cantidad de movimiento lineal**. De igual modo, la "inercia de rotación" de los objetos que giran se llama **cantidad de movimiento angular**. Un planeta que orbita el Sol, una roca que gira sujeta al extremo de una cuerda y los pequeños electrones que giran en torno a los núcleos atómicos tienen todos cantidad de movimiento angular.

La cantidad de movimiento angular se define como el producto de la inercia rotacional y la velocidad rotacional:

$$\text{Cantidad de movimiento angular} = \text{inercia rotacional} \times \text{velocidad rotacional}$$

Es la contraparte de la cantidad de movimiento lineal:

$$\text{Cantidad de movimiento lineal} = \text{masa} \times \text{velocidad}$$

Al igual que la cantidad de movimiento lineal, la cantidad de movimiento angular es una cantidad vectorial y tiene dirección así como magnitud. En este libro no se abordará la naturaleza vectorial de la cantidad de movimiento angular (ni del momento de torsión, que también es un vector), excepto para reconocer la extraordinaria acción del giroscopio. La rueda de bicicleta giratoria de la Figura 8.50 muestra lo que ocurre cuando un momento de torsión causado por la gravedad de la Tierra actúa para cambiar la dirección de su cantidad de movimiento angular (que es a lo largo del eje de la rueda). El tirón de la gravedad que normalmente actúa para tumbar la rueda y cambiar su eje de rotación hace, más bien, que *preceda* en torno a un eje vertical. Tienes que hacerlo tú mismo de pie sobre una tornamesa para creerlo realmente. Es probable que no lo comprendas por completo a menos que realices estudios avanzados en el futuro.

Para el caso de un objeto que sea pequeño comparado con la distancia radial respecto de su eje de rotación, como una lata que gira sujeta de una larga cuerda o un planeta

**FIGURA 8.50**

La cantidad de movimiento angular mantiene el eje de la rueda casi horizontal cuando un momento de torsión proporcionado por la gravedad de la Tierra actúa sobre ella. En lugar de hacer que la rueda caiga, el momento de torsión hace que el eje de la rueda gire lentamente alrededor del círculo de estudiantes. A esto se le llama *precesión*.

que orbita en un círculo alrededor del Sol, la cantidad de movimiento angular puede expresarse como la magnitud de su cantidad de movimiento lineal, $mv$, multiplicada por la distancia radial, $r$ (Figura 8.51). En notación abreviada,

$$\text{Cantidad de movimiento angular} = mvr$$

Así como una fuerza externa neta es indispensable para cambiar la cantidad de movimiento lineal de un objeto, se necesita un momento de torsión externo neto para cambiar la cantidad de movimiento angular de un objeto. Es posible plantear una versión rotacional de la primera ley de Newton (la ley de la inercia):

**Un objeto o sistema de objetos conservará su cantidad de movimiento angular a menos que actúe sobre él un momento de torsión externo neto.**

El sistema solar tiene una cantidad de movimiento angular que incluye al Sol, los planetas que giran y orbitan, y miríadas de otros cuerpos más pequeños. La cantidad de movimiento angular del sistema solar en la actualidad será su cantidad de movimiento angular durante eones por venir. Sólo un momento de torsión externo proveniente del exterior del sistema solar puede cambiarlo. En ausencia de tal momento de torsión, se dice que la cantidad de movimiento angular del sistema solar se conserva.

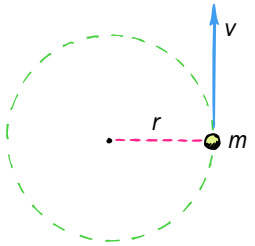



**FIGURA 8.51**
Un objeto pequeño de masa $m$ que gira en una trayectoria circular de radio $r$ con una rapidez $v$ tiene cantidad de movimiento angular $mvr$.

## 8.8 Conservación de la cantidad de movimiento angular

Así como la cantidad de movimiento lineal de cualquier sistema se conserva si sobre el sistema no actúa ninguna fuerza neta, la cantidad de movimiento angular se conserva si no actúa un momento de torsión neto. La **ley de conservación de la cantidad de movimiento angular** afirma:

**Si sobre un sistema en rotación no actúa ningún momento de torsión externo neto, la cantidad de movimiento angular de dicho sistema permanece constante.**

Esto significa que, sin un momento de torsión externo, el producto de la inercia rotacional y la velocidad rotacional en un momento será el mismo que en cualquier otro momento.

Un ejemplo interesante que ilustra la conservación de la cantidad de movimiento angular se muestra en la Figura 8.52. El hombre está de pie sobre una tornamesa de baja fricción con pesas extendidas. Su inercia rotacional, $I$, con la ayuda de las pesas extendidas, es relativamente grande en esta posición. A medida que gira lentamente, su cantidad de movimiento angular es el producto de su inercia rotacional y velocidad rotacional, $\omega$. Cuando lleva las pesas hacia adentro, la inercia rotacional de su cuerpo y las pesas se reduce en forma considerable. ¿Cuál es el resultado? ¡Aumenta su rapidez rotacional! Este ejemplo lo aprecia mejor la persona que gira, quien siente cambios en la rapidez rotacional que parecen misteriosos. ¡Pero es física pura! Este procedimiento lo usa un patinador de figura que comienza a girar con los brazos y acaso una pierna extendidos y luego retrae los brazos y la pierna para obtener una mayor rapidez rotacional. Siempre que un cuerpo en rotación se contrae, su rapidez rotacional aumenta.

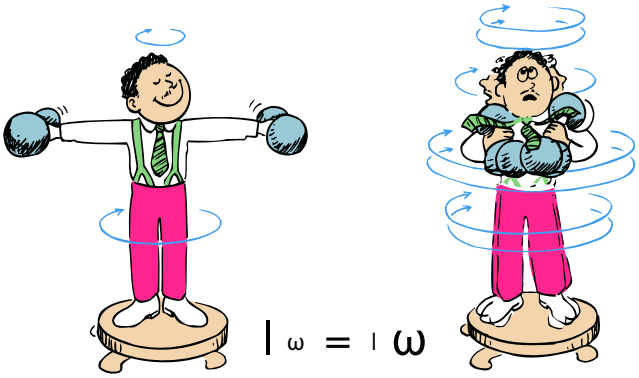



**FIGURA 8.52**
Conservación de la cantidad de movimiento angular. Cuando el hombre lleva los brazos y las pesas giratorias hacia adentro, reduce su inercia rotacional $I$, y su rapidez rotacional aumenta en correspondencia.

**VIDEO: Conservación de la cantidad de movimiento angular cuando se usa una plataforma giratoria**

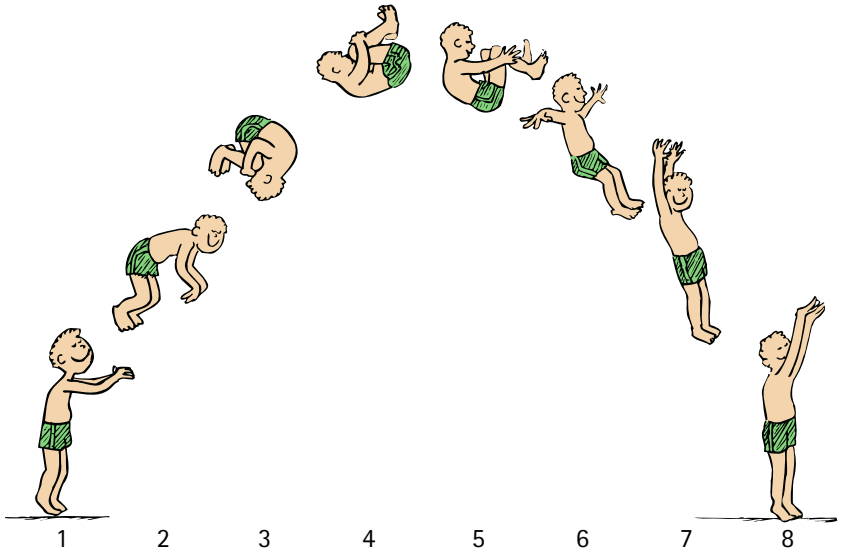



**FIGURA 8.53**
Para controlar la rapidez rotacional, se llevan a cabo variaciones en la inercia rotacional del cuerpo a medida que la cantidad de movimiento angular se conserva durante un salto mortal hacia adelante.

¿Por qué los acróbatas de baja estatura tienen ventaja cuando dan volteretas y realizan otros movimientos rotacionales sucesivos?

De igual modo, cuando un gimnasta gira libremente en ausencia de momentos de torsión desbalanceados sobre su cuerpo, la cantidad de movimiento angular no cambia. Sin embargo, la rapidez rotacional puede cambiar con sólo realizar variaciones en la inercia rotacional. Para hacer esto, se acerca o se aleja alguna parte del cuerpo del eje de rotación.

Si un gato se mantiene boca arriba y se suelta a una corta distancia del suelo, es capaz de ejecutar un giro y aterrizar erguido, incluso si no tiene cantidad de movimiento angular inicial. Para realizar giros y vueltas con cantidad de movimiento angular cero se gira una parte del cuerpo contra la otra. Mientras cae, el gato dobla su columna vertebral y la balancea para girar en la dirección opuesta. Durante esta maniobra la cantidad de movimiento angular total permanece en cero (Figura 8.54). Cuando termina, el gato no está girando. Esta maniobra gira el cuerpo a través de un ángulo, pero no crea rotación continua. Hacerlo violaría la conservación de la cantidad de movimiento angular.

Los seres humanos pueden realizar giros similares sin dificultad, aunque no tan rápido como un gato. Los astronautas aprenden a realizar rotaciones con cantidad de movimiento angular cero conforme orientan sus cuerpos en las direcciones que prefieren cuando flotan libremente en el espacio.

La ley de conservación de la cantidad de movimiento angular se observa en los movimientos de los planetas y las formas de las galaxias. Es fascinante observar que la conservación de la cantidad de movimiento angular indica que la Luna se aleja cada vez más de la Tierra. Esto se debe a que la rotación diaria de la Tierra se reduce lentamente debido a la fricción de las aguas oceánicas sobre el fondo marino, tal como las ruedas de un automóvil frenan cuando se aplican los frenos. Esta disminución de la cantidad de movimiento angular de la Tierra se acompaña de un aumento igual de la cantidad de movimiento angular de la Luna en su movimiento orbital alrededor de la Tierra, lo que resulta en la distancia cada vez mayor de la Luna respecto de la Tierra y en rapidez decreciente. Este aumento de la distancia representa un cuarto de centímetro por rotación. ¿Haz notado que la Luna últimamente se aleja más de nosotros? Bueno, lo hace; cada vez que veas otra Luna llena, ¡estará un cuarto de centímetro más lejos!

¡Oh, sí! Antes de terminar este capítulo, se dará la respuesta a la pregunta 3 del Punto de control de la página 138. Las tapas de las alcantarillas son circulares porque una tapa circular es la única forma que no puede caer en el agujero. Una tapa cuadrada, por ejemplo, puede inclinarse verticalmente y girar de modo que puede caer diagonalmente en el agujero. Lo mismo ocurre con todas las demás formas. Si trabajas en una alcantarilla y algunos chicos traviesos tontean por ahí, ¡estarás agradecido de que la tapa sea redonda!

**FIGURA 8.54**
Fotografía estroboscópica de un gato que cae.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Rapidez tangencial.** Rapidez lineal tangente respecto de una trayectoria curva, como en el movimiento circular.

**Rapidez rotacional.** El número de rotaciones o revoluciones por unidad de tiempo; con frecuencia se mide en rotaciones o revoluciones por segundo o por minuto. (Por lo general, los científicos la miden en radianes por segundo.)

**Inercia rotacional.** Propiedad de un objeto para resistir cualquier cambio en su estado de rotación: si está en reposo, el cuerpo tiende a permanecer en reposo; si está en rotación, tiende a permanecer en rotación y continuará haciéndolo a menos que sobre él actúe un momento de torsión externo neto.

**Momento de torsión.** El producto de fuerza y distancia de brazo de palanca, que tiende a producir o cambiar la rotación:

$$\text{Momento de torsión} = \text{brazo de palanca} \times \text{fuerza}$$

**Centro de masa (CM).** La posición promedio de la masa de un objeto. El CM se mueve como si todas las fuerzas externas actuaran en este punto.

**Centro de gravedad (CG).** La posición promedio del peso o el único punto asociado a un objeto donde puede pensarse que actúa la fuerza de gravedad.

**Equilibrio.** Estado de un objeto en el que no actúa sobre él una fuerza neta o un momento de torsión neto.

**Fuerza centrípeta.** Fuerza dirigida hacia un punto fijo, por lo general la causa de movimiento circular:

$$F = mv^2/r$$

**Fuerza centrífuga.** Aparente fuerza hacia afuera en un marco de referencia en rotación. Es aparente (ficticia) en el sentido de que no es parte de una interacción, sino que es resultado de rotación, sin contraparte de fuerza de reacción.

**Cantidad de movimiento lineal** El producto de la masa de un objeto y su velocidad lineal.

**Cantidad de movimiento angular.** El producto de la inercia rotacional y la velocidad rotacional de un cuerpo en torno a un eje particular. Para un objeto que es pequeño en comparación con la distancia radial, la cantidad de movimiento angular puede expresarse como el producto de masa, rapidez y distancia radial de rotación.

**Conservación de la cantidad de movimiento angular.** Cuando sobre un objeto o sistema de objetos no actúa un momento de torsión externo, no puede ocurrir cambio en la cantidad de movimiento angular. Por tanto, la cantidad de movimiento angular antes de un evento que sólo involucra momentos de torsión internos o ningún momento de torsión es igual a la cantidad de movimiento angular después del evento.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 8.1 Movimiento circular

1. ¿Cuáles son las unidades de medición para la rapidez tangencial? ¿Para la rapidez rotacional?
2. En una tornamesa giratoria, ¿es la rapidez tangencial o la rapidez rotacional la que varía con la distancia respecto del centro?
3. Un vaso inclinado que rueda sobre una superficie plana forma una trayectoria circular. ¿Qué te dice esto acerca de la rapidez tangencial del borde del extremo ancho del vaso en comparación con la del borde del extremo angosto?
4. ¿De qué manera el borde inclinado de una rueda en un ferrocarril permite que una parte del borde tenga mayor rapidez tangencial que otra parte cuando rueda sobre una vía?

### 8.2 Inercia rotacional

5. ¿Qué es la inercia rotacional y en qué se parece a la inercia que estudiaste en capítulos anteriores?
6. La inercia depende de la masa; la inercia rotacional depende de la masa y algo más. ¿De qué?
7. A medida que la distancia aumenta entre la mayor parte de la masa de un objeto y su centro de rotación, ¿la inercia rotacional aumenta o disminuye?
8. Considera tres ejes de rotación para un lápiz: a lo largo del grafito; en ángulo recto con el grafito en el medio; en ángulo recto con el grafito en un extremo. Clasifica las inercias rotacionales en torno a cada eje de menor a mayor.
9. ¿Cuál es más fácil poner a balancear: un bate de béisbol que se sostiene por el extremo angosto, o uno sostenido más cerca del extremo masivo (estrangulado)?
10. ¿Por qué doblar las piernas cuando corres te permite balancearlas de ida y vuelta más rápidamente?
11. ¿Cuál tiene mayor aceleración al rodar por un plano inclinado: un aro o un disco sólido?

### 8.3 Momento de torsión

12. ¿Qué tiende a hacer un momento de torsión a un objeto?
13. ¿Qué se entiende por "brazo de palanca" de un momento de torsión?
14. ¿Cuál es la diferencia entre los momentos de torsión en sentido de las manecillas del reloj y contra las manecillas del reloj cuando un sistema está en equilibrio?

### 8.4 Centro de masa y centro de gravedad

15. Si lanzas un bastón al aire, parece bambolearse en todas partes. Específicamente, ¿en torno a qué lugar parece bambolearse?
16. ¿Dónde está el centro de masa de una pelota de béisbol? ¿Dónde está su centro de gravedad? ¿Dónde están dichos centros para un bate de béisbol?
17. Si te cuelgas en reposo de las manos de una soga vertical, ¿dónde está tu centro de gravedad con respecto a la soga?
18. ¿Dónde está el centro de masa de un balón de *soccer* hueco?
19. ¿Cuál es la relación entre el centro de gravedad y la base de soporte para un objeto que está en equilibrio estable?
20. ¿Por qué la torre inclinada de Pisa no se viene abajo?
21. En términos de centro de gravedad, base de soporte y momento de torsión, ¿por qué no puedes estar de pie con los talones y la espalda contra una pared y luego doblarte para tocarte los dedos de los pies y regresar a tu posición vertical?

### 8.5 Fuerza centrípeta

22. Cuando haces girar una lata sujeta en el extremo de una cuerda en una trayectoria circular, ¿cuál es la dirección de la fuerza que ejerces sobre la lata?
23. Durante el ciclo de giro de una lavadora automática, la fuerza que se ejerce sobre la ropa, ¿es una fuerza hacia adentro o una fuerza hacia afuera?

### 8.6 Fuerza centrífuga

24. Si se rompe la cuerda que mantiene en una trayectoria circular una lata que gira, ¿qué tipo de fuerza hace que se mueva en línea recta: centrípeta, centrífuga o ninguna fuerza? ¿Qué ley de la física apoya tu respuesta?
25. Si no usas cinturón de seguridad en un automóvil que negocia una curva y te deslizas en tu asiento y chocas contra la puerta del automóvil, ¿qué tipo de fuerza es responsable de tu desliz: centrípeta, centrífuga o ninguna fuerza? ¿Por qué la respuesta correcta es "ninguna fuerza"?
26. ¿Por qué la fuerza centrífuga en un marco en rotación se denomina "fuerza ficticia"?
27. ¿Cómo puede simularse la gravedad en una estación espacial en órbita?

### 8.7 Cantidad de movimiento angular

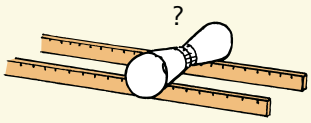
28. Distingue entre cantidad de movimiento lineal y cantidad de movimiento angular.
29. ¿Cuál es la ley de inercia para sistemas en rotación en términos de cantidad de movimiento angular?

### 8.8 Conservación de la cantidad de movimiento angular

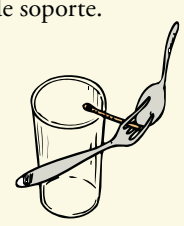
30. Si un patinador que gira lleva sus brazos hacia adentro de modo que reduce su inercia rotacional a la mitad, ¿en cuánto cambiará su cantidad de movimiento angular? ¿En cuánto aumentará su tasa de giro? (¿Por qué tus respuestas son diferentes?)

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

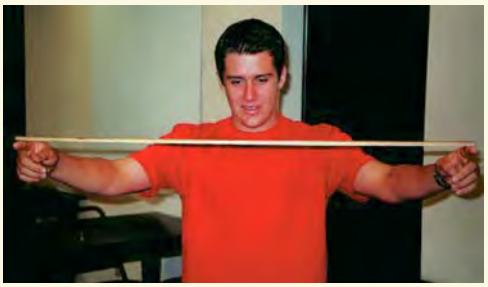
31. Escribe una carta a tu abuelo y cuéntale cómo aprendiste a distinguir entre conceptos muy relacionados, con los ejemplos de fuerza y momento de torsión. Cuéntale en qué se parecen y en qué se diferencian. Sugiere dónde puede encontrar cosas "a la mano" en su casa que puedan ilustrar la diferencia entre los dos. Cita también un ejemplo que muestre cómo la fuerza neta sobre un objeto puede ser cero aunque el momento de torsión neto no lo sea, así como un ejemplo que muestre lo contrario. (¡Ahora, alegra a tu abuelo y *envíale* una verdadera carta!)
32. Une un par de vasos de espuma de estireno por sus extremos anchos y ponlos a rodar sobre un par de metros que simulen vías de ferrocarril. Observa cómo se autocorrigen siempre que sus trayectorias se alejan del centro. Pregunta: si pegas los vasos por sus extremos angostos, de modo que se inclinen opuestos como se muestra, ¿el par de vasos se autocorregiría cuando ruede un poco fuera del centro?



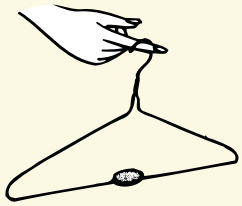

33. Une un tenedor, una cuchara y un fósforo de madera como se muestra. La combinación se equilibrará bastante bien, en el borde de un vaso, por ejemplo. Esto ocurre porque el centro de gravedad en realidad "cuelga" por abajo del punto de soporte.



34. Párate con los talones y la espalda contra la pared y trata de doblarte y tocarte los dedos de los pies. Descubrirás que tienes que alejarte de la pared para hacerlo sin caer. Compara la distancia mínima de tus talones con respecto de la pared, con la de un amigo del sexo opuesto. ¿Quién puede tocarse los dedos de los pies con los talones más cerca de la pared: hombres o mujeres? En promedio, y en proporción a la estatura, ¿cuál género tiene el centro de gravedad más bajo?
35. Primero pide a un amigo que se pare de frente a una pared con los dedos de los pies en contacto con la pared. Luego pídele que se pare sobre los talones sin caer hacia atrás. Tu amigo no podrá hacerlo. Ahora explica por qué no puede hacerlo.
36. Apoya un metro sobre tus dos dedos índices extendidos como se muestra. Junta lentamente los dedos. ¿En qué parte del metro se reúnen los dedos? ¿Puedes explicar por qué esto siempre ocurre, sin importar dónde comiencen tus dedos?



37. Coloca el gancho de una percha sobre tu dedo. Con cuidado equilibra una moneda en el alambre recto en el fondo justo debajo del gancho. Tal vez tendrás que aplanar el alambre con un martillo o crear una pequeña plataforma con cinta. Con una cantidad sorprendentemente pequeña de práctica podrás balancear la percha y la moneda equilibrada de ida y vuelta y luego en círculos. La fuerza centrípeta mantiene la moneda en su lugar.



## SUSTITUYE Y LISTO (FAMILIARIZACIÓN CON ECUACIONES)

**Momento de torsión = brazo de palanca × fuerza**

38. Calcula el momento de torsión producido por una fuerza perpendicular de 50 N sobre el extremo de una llave de 0.2 m de largo.
39. Calcula el momento de torsión producido por la misma fuerza de 50 N cuando la longitud de la llave se extiende con un tubo a 0.5 m.

**Fuerza centrípeta: $F = mv^2/r$**

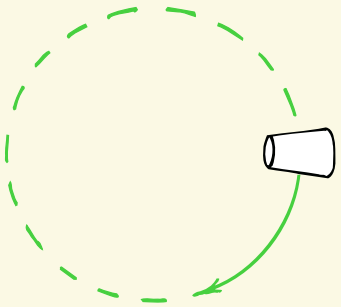
40. Calcula la tensión en una cuerda horizontal que gira un juguete de 2 kg en un círculo de 2.5 m de radio cuando se mueve a 3 m/s sobre una superficie helada.
41. Calcula la fuerza de fricción que mantiene a una persona de 80 kg sentada en el borde de una plataforma giratoria horizontal cuando la persona se sienta a 2 m desde el centro de la plataforma y tiene una rapidez tangencial de 3 m/s.

**Cantidad de movimiento angular = $mvr$**

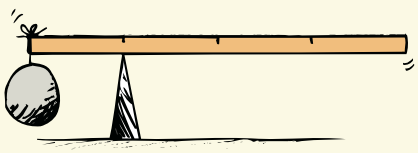
42. Calcula la cantidad de movimiento angular de la persona en el problema anterior.
43. Si la rapidez de una persona se duplica y todo lo demás permanece igual, ¿cuál será la cantidad de movimiento angular de la persona?

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

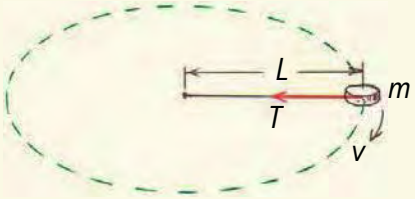
44. El diámetro de la base de un vaso inclinado mide 6 cm. El diámetro de su boca es de 9 cm. La trayectoria del vaso se curva cuando lo ruedas encima de una mesa. ¿Cuál extremo, la base o la boca, rueda más rápido? ¿Cuánto más rápido?



45. Para apretar un tornillo, empujas con una fuerza de 80 N en el extremo del mango de una llave que está a 0.25 m del eje del tornillo.
    a. ¿Qué momento de torsión ejerces?
    b. Mueve tu mano hacia adentro para estar a sólo 0.10 m del tornillo. Para lograr el mismo momento de torsión, demuestra que debes ejercer 200 N de fuerza.
    c. ¿Tus respuestas dependen de la dirección de tu empuje en relación con la dirección del mango de la llave?
46. La roca y el metro se equilibran en la marca de 25 cm, como se muestra en el dibujo. El metro tiene una masa de 1 kg. ¿Cuál debe ser la masa de la roca?



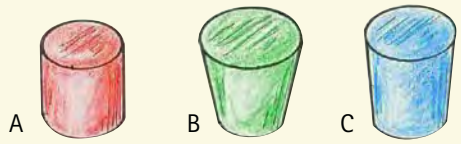
47. En una de las fotografías al comienzo de este capítulo, Mary Beth usa un sensor de momento de torsión que consiste en un metro sostenido en el extremo de 0 cm con un peso que cuelga de varias posiciones a lo largo del metro. Si el metro se sostiene horizontalmente, se produce momento de torsión cuando un objeto de 1 kg cuelga de la marca de 50 cm. ¿Cuánto más momento de torsión se ejerce cuando el objeto cuelga de la marca de 75 cm? ¿De la marca de 100 cm?
48. Un disco de hielo de masa $m$ da vueltas sobre una superficie helada en un círculo con rapidez $v$ al final de una cuerda horizontal de longitud $L$. La tensión en la cuerda es $T$.



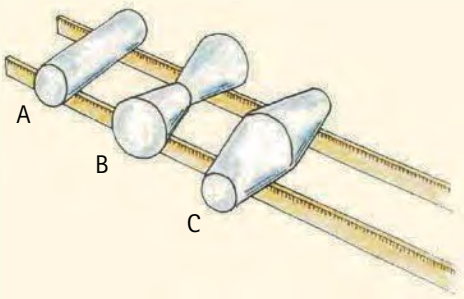

    a. Escribe la ecuación de la fuerza centrípeta y sustituye los valores $T$ y $L$ correctamente. Luego, con un poco de álgebra elemental, reordena la ecuación de modo que se resuelva la masa.
    b. Demuestra que la masa del disco es 5 kg cuando la longitud de la cuerda es 2 m, la tensión en la cuerda es de 10 N y la rapidez tangencial del disco es 2 m/s.
49. Si un artista del trapecio gira una vez cada segundo mientras pasea por el aire y se contrae para reducir su inercia rotacional a un tercio de lo que era, ¿cuántas rotaciones por segundo resultarán?
50. Un pequeño telescopio espacial en el extremo de una línea de sujeción de longitud $L$ se mueve con rapidez lineal $v$ alrededor de una estación espacial central.
    a. ¿Cuál será la rapidez lineal del telescopio si la longitud de la línea se reduce a 0.33 $L$?
    b. Si la rapidez lineal inicial del telescopio es 1.0 m/s, ¿cuál es su rapidez cuando se jala hacia adentro a un tercio de su distancia inicial desde la estación espacial?

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

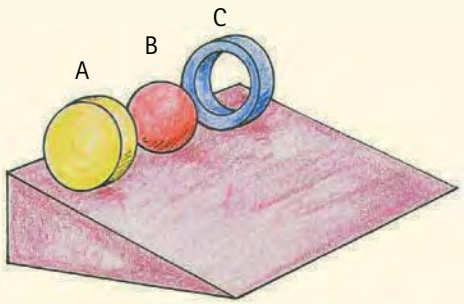
51. Los tres vasos se ponen a rodar sobre una superficie horizontal. Clasifica los vasos por la cantidad que se alejan de una trayectoria en línea recta (de más curva a menos curva).



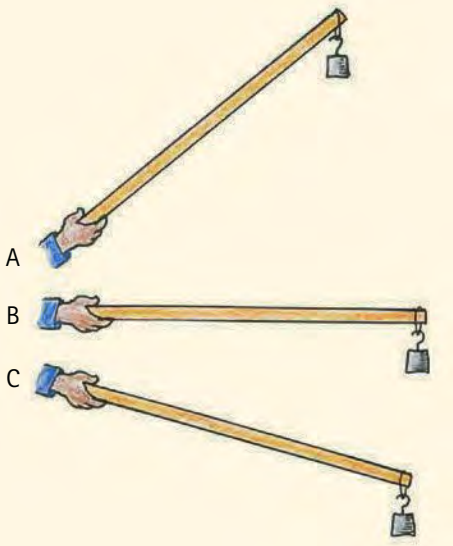

52. Tres tipos de rodillos se colocan sobre vías fabricadas con metros paralelos ligeramente inclinados, como se muestra. De mayor a menor, clasifica los rodillos en términos de su capacidad para permanecer estables mientras ruedan.



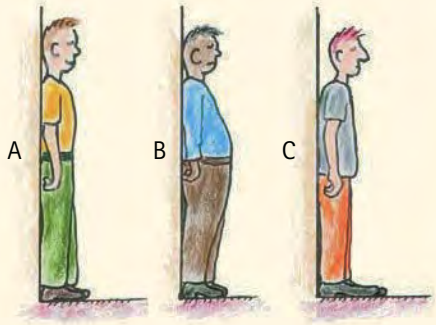

53. A partir de una posición de reposo, un disco sólido A, una bola sólida B y un aro C corren por un plano inclinado. Clasifícalos en orden de llegada: ganador, segundo lugar y tercer lugar.




54. Sostén un metro con la misma masa suspendida en el extremo opuesto. Clasifica el momento de torsión necesario para mantener el metro estacionario, de mayor a menor.




55. Tres estudiantes de física con buena condición física están de pie con la espalda contra la pared. Su tarea es inclinarse y tocarse los dedos de los pies sin caer. Clasifica sus posibilidades de éxito de mayor a menor.

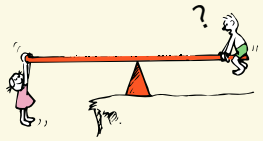



## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

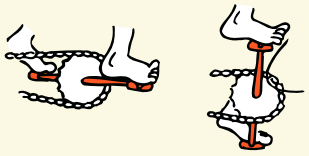
56. Mientras viaja en una rueda de la fortuna, Sam Chungo tontea y sale de su silla y avanza a lo largo del rayo de modo que está a la mitad del eje. ¿Cómo se compara su rapidez rotacional con la de sus amigos que permanecen en la silla? ¿Cómo se compara su rapidez tangencial? ¿Por qué tus respuestas son diferentes?
57. Dan y Sue viajan en bicicleta con la misma rapidez. Las llantas de la bicicleta de Dan tienen un diámetro más grande que las de la bicicleta de Sue. ¿Cuáles ruedas, si alguna, tienen mayor rapidez rotacional?
58. Usa la ecuación $v = r\omega$ para explicar por qué el extremo de un matamoscas se mueve mucho más rápido que tu muñeca cuando aplastas una mosca.
59. Las ruedas de los ferrocarriles están inclinadas, una característica especialmente importante en las curvas. ¿De qué manera, si la hay, la cantidad de inclinación se relaciona con lo cerrado que pueden ser las curvas?
60. A menudo se observa que los flamencos se paran sobre una pata y alzan la otra. ¿Su inercia rotacional aumenta con las patas largas? ¿Qué puedes decir acerca del centro de masa del ave con respecto al pie sobre el cual se para?

61. Las ruedas delanteras de un vehículo de carreras se ubican muy lejos enfrente para ayudar a evitar que el vehículo suba la nariz cuando acelera. ¿Qué conceptos físicos entran en juego aquí?

62. ¿Cuál tendrá mayor aceleración al rodar hacia abajo de un plano inclinado: una bola de boliche o un balón de vóleibol? Defiende tu respuesta.
63. Una pelota de *softball* y un balón de básquetbol parten del reposo y ruedan por un plano inclinado. ¿Cuál bola llegará primero al fondo? Defiende tu respuesta.
64. ¿El momento de torsión neto cambia cuando un compañero en un subibaja se pone de pie o se cuelga de su extremo en lugar de sentarse? (¿Cambian el peso o el brazo de palanca?)

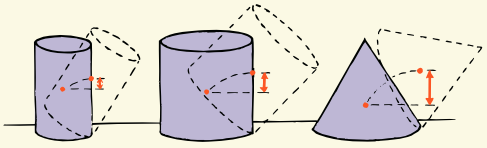


65. ¿Una fuerza puede producir un momento de torsión cuando no hay brazo de palanca?
66. Cuando pedaleas una bicicleta, se produce máximo momento de torsión cuando los brazos del pedal están en posición horizontal y no se produce momento de torsión cuando están en posición vertical. Explica.

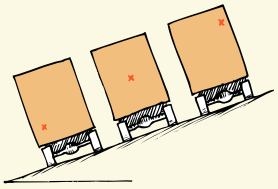


67. Cuando la línea de acción de una fuerza interseca el centro de masa de un objeto, ¿dicha fuerza puede producir un momento de torsión en torno al centro de masa del objeto?
68. Cuando una bola de boliche abandona tu mano, puede no girar. Pero más lejos en la bolera, sí gira. ¿Qué produce el giro?
69. ¿Por qué sentarse más cerca del centro de un vehículo proporciona el viaje más cómodo en un autobús que viaja sobre un camino lleno de baches, en un barco en un mar picado o en un avión en aire turbulento?
70. Si supones que tus pies no se mantienen abajo, ¿qué es más difícil: hacer abdominales con las rodillas dobladas o con las piernas estiradas?
71. Explica por qué una pértiga larga es más conveniente para un funámbulo si la pértiga cuelga con laxitud.

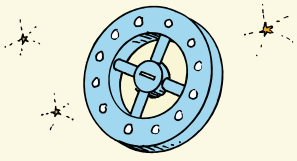
72. ¿Por qué debes doblarte hacia adelante cuando llevas una pesada carga sobre la espalda?
73. ¿Por qué el movimiento bamboleante de una sola estrella es indicio de que la estrella tiene uno o más planetas que orbitan alrededor de ella?
74. ¿Por qué es más fácil transportar la misma cantidad de agua en dos cubetas, una en cada mano, que en una sola cubeta?
75. ¿Dónde está el centro de masa de la atmósfera de la Tierra?
76. Con las ideas de momento de torsión y centro de gravedad, explica por qué una bola rueda colina abajo.
77. ¿Por qué es importante asegurar los archiveros al piso, en especial aquellos con cargas pesadas en los cajones superiores?
78. Describe las estabilidades comparativas de los tres objetos que se muestran en términos de trabajo y energía potencial.



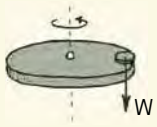
79. Los centros de gravedad de los tres camiones estacionados en una colina se muestran con las X. ¿Cuál(es) camión(es) se volteará(n)?



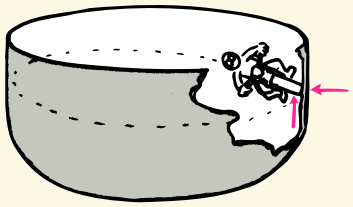
80. Un automóvil de carreras sobre una pista circular plana necesita fricción entre las llantas y la pista para mantener su movimiento circular. ¿Cuánta más fricción se necesita para el doble de rapidez?
81. ¿Un objeto puede moverse por una trayectoria curva si no actúa ninguna fuerza sobre él? Defiende tu respuesta.
82. A medida que un automóvil acelera cuando negocia una curva, ¿la fuerza centrípeta sobre el automóvil también aumenta? Defiende tu respuesta.
83. Cuando estás en el asiento del pasajero de un automóvil que da vuelta a la izquierda, puedes sentirte presionado contra la puerta del lado derecho. ¿Por qué presionas contra la puerta? ¿Por qué la puerta presiona sobre ti? ¿Tu explicación tiene que ver con una fuerza centrífuga o las leyes de Newton?
84. La fricción es necesaria para que un automóvil negocie una curva. Pero, si el camino está peraltado, puede no necesitarse fricción en absoluto. ¿Qué proporciona, entonces, la fuerza centrípeta necesaria? (*Sugerencia:* considera componentes vectoriales de la fuerza normal sobre el automóvil.)
85. ¿Bajo qué condiciones un automóvil que se mueve rápidamente podría permanecer en una pista peraltada cubierta con hielo resbaloso?
86. Explica por qué una fuerza centrípeta *no* realiza trabajo sobre un objeto que se mueve circularmente.
87. La ocupante dentro de un hábitat espacial giratorio del futuro siente que es empujada por gravedad artificial contra la pared exterior del hábitat (que se convierte en el "piso"). Explica qué ocurre en términos de las leyes de Newton y la fuerza centrípeta.



88. El dibujo muestra una moneda en el borde de una tornamesa. El peso de la moneda se muestra con el vector ***W***. Otras dos fuerzas actúan sobre la moneda: la fuerza normal y una fuerza de fricción que impide que se deslice del borde. Dibuja los vectores de fuerza para estas dos.



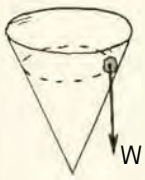

89. Un motociclista puede viajar sobre la pared vertical de una pista con forma de tazón, como se muestra. La fricción de la pared sobre las llantas se muestra mediante el vector vertical rojo. (a) ¿Cómo se compara la magnitud de este vector con el peso de la motocicleta y el piloto? (b) ¿El vector horizontal rojo representa la fuerza normal que actúa sobre la motocicleta y el piloto, la fuerza centrípeta, ambas o ninguna? Defiende tu respuesta.



90. El dibujo muestra un péndulo cónico. La lenteja se balancea en una trayectoria circular. La tensión ***T*** y el peso ***W*** se muestran con vectores. Dibuja un paralelogramo con estos vectores y muestra que sus resultantes se encuentran en el plano del círculo. (Consulta la regla del paralelogramo en el Capítulo 2.) ¿Cuál es el nombre de esta fuerza resultante?

91. Te sientas en el medio de una gran tornamesa en un parque de diversiones cuando se la pone a girar y luego se le deja girar libremente. Cuando te desplazas hacia el borde de la tornamesa, ¿la tasa de la rotación aumenta, disminuye o permanece invariable? ¿Qué principio físico apoya tu respuesta?

92. Considera una bola que rueda en una trayectoria circular en la superficie interior de un cono. El peso de la bola se muestra mediante el vector ***W***. Sin fricción, sólo otra fuerza actúa sobre la bola: una fuerza normal. (a) Dibuja el vector de la fuerza normal. (La longitud del vector depende del siguiente paso, b.) (b) Con la regla del paralelogramo, demuestra que la resultante de los dos vectores es a lo largo de la dirección radial de la trayectoria circular de la bola. (Sí, ¡la normal es mucho más grande que el peso!)




93. Una cantidad considerable de suelo se barre hacia el río Mississippi y se deposita en el Golfo de México cada año. ¿Qué efecto tiene esta tendencia sobre la duración del día? (*Sugerencia:* relaciona esto con la Figura 8.52.)

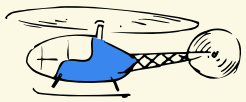
94. Si todos los habitantes de la Tierra se movieran hacia el ecuador, ¿cómo afectaría esto la inercia rotacional de la Tierra? ¿Cómo afectaría la duración del día?

95. Estrictamente hablando, a medida que se construyen más rascacielos sobre la superficie de la Tierra, ¿el día tiende a volverse más largo o más corto? Y, estrictamente hablando, ¿la caída de las hojas de otoño tiende a alargar o a acortar el día de 24 horas? ¿Qué principio físico apoya tus respuestas?

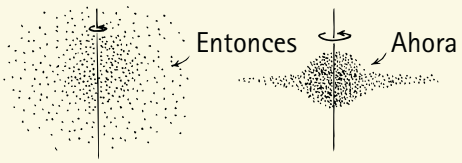
96. Si la población del mundo se moviera hacia el Polo Norte y el Polo Sur, ¿el día de 24 horas se volvería más largo, más corto o permanecería igual?

97. Si las capas de hielo polar sobre la superficie sólida de la Tierra se derritieran, los océanos serían más profundos. Estrictamente hablando, ¿qué efecto tendría esto sobre la rotación de la Tierra?

98. ¿Por qué un pequeño helicóptero común, con un solo rotor principal, tiene un segundo rotor pequeño en la cola? Describe la consecuencia si el rotor pequeño falla en pleno vuelo.



99. Se cree que nuestra galaxia se formó a partir de una enorme nube de gas. La nube original era mucho más grande que el tamaño actual de la galaxia, era más o menos esférica, y giraba mucho más lentamente de lo que hace ahora la galaxia. En este dibujo se ve la nube original y la galaxia como es ahora (vista desde el borde). Explica cómo el tirón hacia adentro de la gravedad y la conservación de la cantidad de movimiento angular contribuyeron a la forma actual de la galaxia y por qué ahora gira más rápido que cuando era una nube esférica más grande.

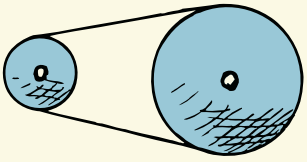



100. La Tierra no es esférica, sino que tiene abultamientos en el ecuador. Júpiter tiene más protuberancias. ¿Cuál es la causa de estos abultamientos?

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

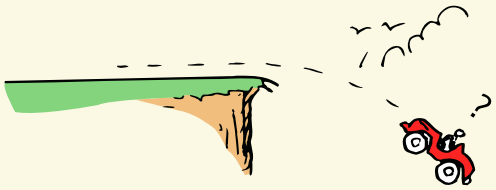
101. El velocímetro de un automóvil está configurado para leer rapidez proporcional a la rapidez rotacional de sus ruedas. Si las ruedas descomunales de este automóvil rojo se instalaran sin hacer correcciones al velocímetro, discute si la lectura del velocímetro será mayor o menor, o no cambiará.

102. Una gran rueda se acopla a una rueda con la mitad de diámetro, como se muestra en el dibujo. ¿Cómo se compara la rapidez rotacional de la rueda menor con la de la rueda más grande? Discute las comparaciones de las rapideces tangenciales en los bordes (si supones que la banda no resbala).

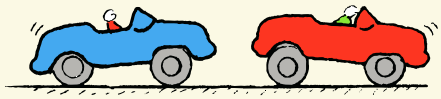


103. En este capítulo aprendiste que un objeto puede *no* estar en equilibrio mecánico aun cuando $\Sigma F = 0$. Discute qué más define el equilibrio mecánico.

104. Cuando un automóvil cae por un risco gira hacia adelante mientras cae. Para una mayor rapidez de salida del risco, discute si el automóvil girará más o menos. (Considera el tiempo que actúa el momento de torsión desbalanceado.)



105. Discute por qué un automóvil sube la nariz cuando acelera y baja la nariz cuando frena.



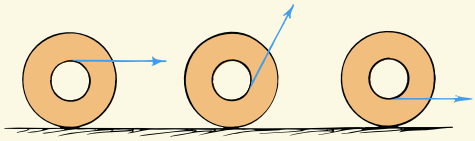
106. Discute cómo una rampa te ayudaría a distinguir entre dos esferas del mismo peso con aspecto idéntico, una sólida y la otra hueca.

107. ¿Cuál rodará más rápido por un plano inclinado: una lata de agua o una lata de hielo? Discute y explica.

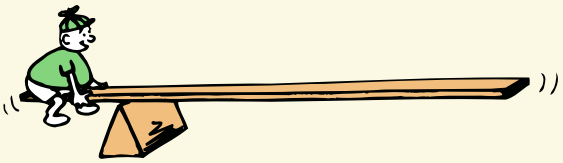
108. ¿Por qué se prefieren las ruedas ligeras en las carreras de bicicletas? Discute y explica.

109. Un joven que entró a una carrera de cajas de cartón (en la que vehículos de cuatro ruedas sin impulso ruedan desde el reposo por una colina) se pregunta si debe usar grandes ruedas masivas o unas ligeras. Además, ¿las ruedas deben tener rayos o ser sólidas? ¿Qué consejo le darías?

110. El carrete se jala en tres formas, como se muestra. Hay suficiente fricción para la rotación. ¿En qué dirección rodará el carrete en cada caso? Discute y explica.



111. Nadie en el parque quiere jugar con el niño molestoso, así que hace un subibaja como el que se muestra para poder jugar solo. Discute cómo hace esto.



112. ¿Cómo pueden apilarse los tres ladrillos de modo que el ladrillo superior tenga el máximo desplazamiento horizontal respecto del ladrillo inferior? Por ejemplo, apilarlos como sugieren las líneas punteadas sería inestable y los ladrillos caerían. (*Sugerencia:* comienza con el ladrillo superior y trabaja hacia abajo. En cada nivel, el CG de los ladrillos de arriba no debe extenderse fuera del extremo del ladrillo de soporte.)

113. Una larga pista equilibrada como un subibaja sostiene una bola de golf y una bola de billar más masiva con un resorte comprimido entre las dos. Cuando el resorte se suelta, las bolas se alejan una de otra. ¿La pista se inclina en sentido de las manecillas del reloj, contra las manecillas del reloj o permanece en equilibrio conforme las bolas ruedan hacia afuera? ¿Qué principios usas para tu análisis y explicación?

114. Con respecto al dedo de Diana, ¿dónde está el centro de masa del ave plástica? Discute cómo puede lograrse este equilibrio durante su fabricación.

115. Cuando una bala de cañón de largo alcance se dispara hacia el ecuador desde una latitud norte (o sur), aterriza al oeste de su longitud "pretendida". Analiza por qué esto es así. (*Sugerencia:* considera una pulga que salta desde parte del camino hacia el borde exterior de una tornamesa giratoria.)

116. Con frecuencia se dice que la fuerza causa aceleración. Pero cuando Evan viajó en un trineo cohete en Bonneville Salt Flats, la sangre se forzó hacia la parte posterior de su cerebro y casi se desmaya. Analiza e identifica la causa de esta fuerza.

9

CAPÍTULO 9

# Gravedad


9.1 La ley de gravitación universal

9.2 La constante de gravitación universal, *G*

9.3 Gravedad y distancia: la ley del inverso al cuadrado

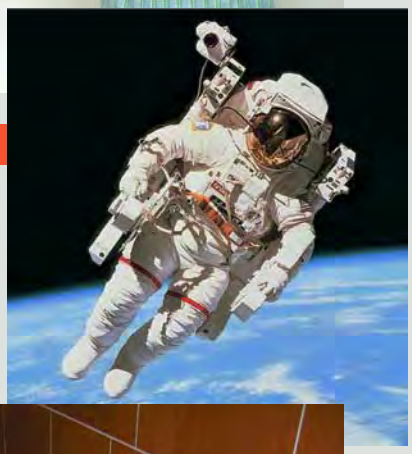
9.4 Peso e ingravidez

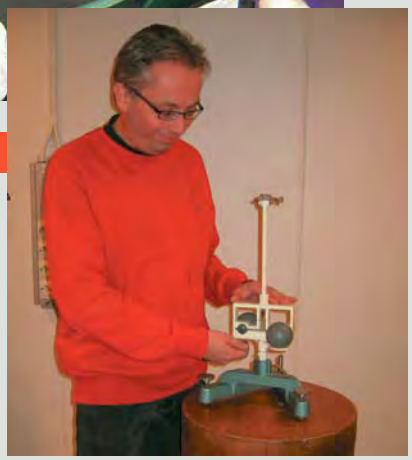
9.5 Mareas oceánicas

9.6 Campos gravitacionales

9.7 Agujeros negros

9.8 Gravitación universal





**1** Ed van den Berg pregunta a sus estudiantes: ¿dónde, entre la Tierra y la Luna, los campos gravitacionales de cada uno se cancelan en cero? **2** Contrario a lo que cree la mayoría de la gente, la fuerza gravitacional sobre el astronauta que realiza una caminata espacial es casi tan intensa como cuando está sobre la superficie de la Tierra. Entonces, ¿por qué el astronauta no cae a la Tierra? En el Capítulo 10 verás que el astronauta, al igual que todos los satélites terrestres, cae continuamente *alrededor* de la Tierra. **3** Eric Mazur logra el éxito pedagógico de involucrar a sus alumnos en discusiones en clase. **4** Tomas Brage utiliza un modelo didáctico de un aparato de Cavendish para medir *G*.

Eric Mazur, un carismático y prominente físico de la Universidad de Harvard, es conocido por sus aportaciones al estudio de la física óptica. Entre los educadores se le conoce mejor por su método didáctico de involucrar a sus alumnos universitarios de física en debates dentro de grandes salones de clases. Consigue estructurar los debates estudiantiles e incorporarlos en sus disertaciones. Hace años, en clases múltiples de 300 o más estudiantes no específicamente de ciencias, en el City College de San Francisco, el autor de este libro incorporó las discusiones estudiantiles en sus clases. "Examina a tu compañero" era su tarjeta de presentación. Antes de introducir nuevo material, el autor planteaba preguntas de respuesta corta y animaba a los alumnos a revisar sus razonamientos con los compañeros de clase que estaban a su alrededor. La experiencia demostró que los estudiantes recordaban mejor lo que decían, no lo que pensaban. La meta del autor era hacer que los alumnos verbalizaran la física que aprendían.

Y así es hasta el día de hoy con Eric Mazur. Sin estar enterado del éxito del autor con las discusiones estudiantiles en grandes salones de clases, él elaboró su propio método de "Examina a tu compañero". Plantear preguntas a los estudiantes es una cosa; otra cosa es formular preguntas que intriguen a los alumnos, preguntas que propicien la comprensión de conceptos, preguntas que permitan distinguir entre casi saber la respuesta y comprenderla. ¡Eric Mazur fue y es experto en eso! Él dio un paso más y publicó *Peer Instruction* (Enseñanza de los compañeros), un libro lleno de ingeniosas preguntas en un formato de opción múltiple, con diagramas adecuados, para educadores de todas partes. El autor tuvo el gusto de utilizar las preguntas de Eric con sus grupos de estudiantes de ciencia e ingeniería justo antes de su jubilación. Dichas preguntas ayudaron a que las discusiones estudiantiles fueran las mejores que hubiese experimentado.

Eric Mazur ahora imparte un curso de introducción a la física que incluye trabajo en equipo y proyectos. Los estudiantes trabajan en equipos de cuatro o cinco en proyectos de seis meses. ¡Este curso de cálculo no tiene ni conferencias ni exámenes! La idea es crear un ambiente donde los alumnos se hagan cargo de su aprendizaje. No estudian para aprobar el examen; en vez de ello, estudian para aprender cómo terminar el proyecto. Esto es catalizador de aprendizaje, un sistema de valoración basado en la nube que proporciona realimentación instantánea a los instructores y ayuda a los estudiantes a involucrarse de una manera más efectiva con sus compañeros. Si alguna vez entraras en su salón de clase, verías a los estudiantes ocupados planeando una misión a Marte o tratando de encontrar formas de utilizar la electricidad estática para resolver un problema ambiental. Sí, ¡la física puede ser divertida!

## 9.1 La ley de gravitación universal

Desde la época de Aristóteles, el movimiento circular de los cuerpos celestiales se consideraba natural. Los antiguos creyeron que las estrellas, los planetas y la Luna se movían en círculos divinos. En lo que respecta a los antiguos, este movimiento circular no requería explicación. De acuerdo con la leyenda popular, Isaac Newton estaba sentado bajo un manzano cuando lo golpeó la idea de que lo que jala a las manzanas de los árboles es la misma fuerza que mantiene a la Luna dando vueltas a la Tierra. Una fuerza de gravedad puede explicar el movimiento de los planetas. Otras personas de su época, influidos por Aristóteles, suponían que cualquier fuerza sobre un planeta estaría dirigida a lo largo de su trayectoria. No obstante, Newton razonó que la fuerza sobre cada planeta se dirigiría hacia un punto central fijo: el Sol. El golpe de intuición de Newton, que la fuerza entre la Tierra y una manzana es la misma fuerza que jala lunas y planetas y todo lo demás en el Universo, fue un rompimiento revolucionario con la noción prevaleciente de que había dos conjuntos de leyes naturales: una para los eventos terrestres y otra, completamente diferente, para el movimiento en los cielos. Esta unión de leyes terrestres y leyes cósmicas se llamó *síntesis newtoniana*.

Para comprobar su hipótesis de que la gravedad de la Tierra llega a la Luna, Newton comparó la caída de una manzana con la "caída" de la Luna. Se dio cuenta de que la Luna cae en el sentido de que *cae alejándose de la línea recta que seguiría si no hubiera fuerzas que actuaran sobre ella*. Debido a su velocidad tangencial, "cae" alrededor de la Tierra (en el siguiente capítulo se hablará más acerca de esto). Por simple geometría, la distancia de caída por segundo de la Luna podía compararse con la distancia que una manzana o cualquier cosa así de alejada caería en un segundo. Los cálculos de Newton no concordaban. Desilusionado, pero reconociendo que el dato bruto siempre debe ganar sobre una hermosa hipótesis, colocó sus escritos en un

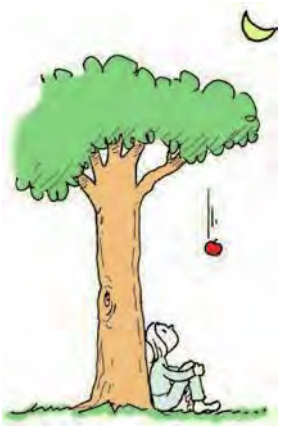


**FIGURA 9.1**
¿El tirón gravitacional sobre la manzana podría llegar a la Luna?

La velocidad tangencial de un planeta o luna que se mueve en un círculo está en ángulo recto con respecto a la fuerza de gravedad

cajón donde permanecieron casi 20 años. Durante este periodo fundó y desarrolló el campo de la óptica, por el cual se volvió famoso.

El interés de Newton en la mecánica se reavivó con la aparición de un espectacular cometa en 1680, y otro, 2 años después. Regresó al problema de la Luna gracias al estímulo de su amigo astrónomo Edmund Halley, en cuyo honor se nombró después el segundo cometa. Newton hizo correcciones a los datos experimentales utilizados en su método anterior y obtuvo excelentes resultados. Sólo entonces publicó lo que constituye una de las generalizaciones de mayor alcance de la mente humana: la **ley de gravitación universal**.[1]

Todo jala sobre todo lo demás en una forma hermosamente sencilla que sólo involucra masa y distancia. De acuerdo con Newton, todo cuerpo atrae a todos los demás cuerpos con una fuerza que, para cualesquiera dos cuerpos, es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros. Este enunciado puede expresarse como:

$$\text{Fuerza} \sim \frac{\text{masa}_1 \times \text{masa}_2}{\text{distancia}^2}$$

O, en forma simbólica,

$$F \sim \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

donde $m_1$ y $m_2$ son las masas de los cuerpos y $d$ es la distancia entre sus centros. Por tanto, cuanto mayores sean las masas $m_1$ y $m_2$, mayor será la fuerza de atracción entre ellas, en proporción directa a las masas.[2] Cuanto mayor sea la distancia de separación $d$, más débil será la fuerza de atracción, en proporción inversa al cuadrado de la distancia entre sus centros de masa.

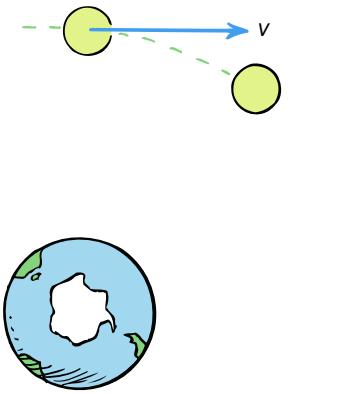



**FIGURA 9.2**
La velocidad tangencial de la Luna en torno a la Tierra le permite caer alrededor de la Tierra en lugar de directo hacia ella. Si esta velocidad tangencial se redujera a cero, ¿cuál sería el destino de la Luna?

## PUNTO DE CONTROL

1. **En la Figura 9.2 se ve que la Luna cae alrededor de la Tierra en lugar de hacerlo directo hacia ella. Si la velocidad tangencial de la Luna fuera cero, ¿cómo se movería?**
2. **De acuerdo con la ecuación de la fuerza gravitacional, ¿qué ocurre con la fuerza entre dos cuerpos si la masa de uno de los cuerpos se duplica? ¿Si ambas masas se duplican?**
3. **La fuerza gravitacional actúa sobre todos los cuerpos en proporción a sus masas. ¿Por qué, entonces, un cuerpo pesado no cae más rápido que un cuerpo ligero?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. ¡La Luna caería directo hacia abajo y chocaría con la Tierra!
2. Cuando una masa se duplica, la fuerza entre ella y la otra masa se duplica. Si ambas masas se duplican, la fuerza es cuatro veces mayor.
3. La repuesta remite al Capítulo 4. Recuerda la Figura 4.12, en la que los ladrillos pesado y ligero caen con la misma aceleración porque ambos tienen la misma proporción entre peso y masa. La segunda ley de Newton ($a = F/m$) te recuerda que una mayor fuerza que actúa sobre una mayor masa no resulta en una mayor aceleración.

[1]Éste es un ejemplo exagerado del esfuerzo esmerado y la verificación que exige la formulación de una teoría científica. Compara el método de Newton y la manera como otros suelen defender teorías poco científicas sin "hacer su tarea", con juicios apresurados y sin hacer una verificación de sus pronunciamientos.

[2]Observa aquí la función diferente de la masa. Hasta el momento, la masa se ha tratado como una medida de inercia, que se llama *masa inercial*. Ahora se considera a la masa como una propiedad que afecta a la fuerza gravitacional, que en este contexto se llama *masa gravitacional*. De manera experimental se estableció que las dos son iguales y, como cuestión de principio, la equivalencia de la masa inercial y la gravitacional es el fundamento de la teoría de la relatividad general de Einstein.

## 9.2 La constante de gravitación universal, $G$

La forma de proporcionalidad de la ley de gravitación universal puede expresarse como una ecuación exacta cuando se introduce la constante de proporcionalidad $G$. $G$ se llama *constante de gravitación universal*. Entonces la ecuación es:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{d^2}$$

Las unidades de $G$ hacen que la fuerza aparezca en newtons. La magnitud de $G$ es la misma que la fuerza gravitacional entre dos masas de 1 kilogramo que están separadas 1 metro: 0.0000000000667 newton. De modo que:

$$G = 6.67 \times 10^{-11}\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$$

Éste es un número extremadamente pequeño.[3] Muestra que la gravedad es una fuerza muy débil comparada con las fuerzas eléctricas. La gran fuerza gravitacional neta que sientes como peso se debe al enorme número de átomos en el planeta Tierra que jalan sobre ti.

Es interesante que Newton pudiera calcular el producto de $G$ y la masa de la Tierra, pero ninguno de los dos por separado. El cálculo de $G$ de forma aislada lo hizo por primera vez el físico inglés Henry Cavendish en 1798, más de 70 años después de la muerte de Newton.

Para medir $G$ Cavendish midió la pequeña fuerza entre masas de plomo con una balanza de torsión extremadamente sensible, como muestra el profesor Brage en una de las fotografías al comienzo de este capítulo. Un método más sencillo lo desarrolló después Philipp von Jolly, quien unió un matraz esférico de mercurio a un brazo de una balanza sensible (Figura 9.4). Después de que la balanza se ponía en equilibrio, una esfera de plomo de 6 ton rodaba abajo del matraz de mercurio. La fuerza gravitacional entre las dos masas se midió por el peso necesario en el extremo opuesto de la balanza para restaurar el equilibrio. Todas las cantidades, $m_1$, $m_2$, $F$ y $d$, eran conocidas, de lo cual se calculó la constante $G$:

$$G = \frac{F}{\left(\frac{m_1 m_2}{d^2}\right)} = 6.67 \times 10^{-11}\frac{\text{N}}{\text{kg}^2/\text{m}^2} = 6.67 \times 10^{-11}\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$$

El valor de $G$ muestra que la gravedad es la más débil de las cuatro fuerzas fundamentales conocidas en la actualidad. (Las otras tres son la fuerza electromagnética y los dos tipos de fuerzas nucleares.) La gravitación sólo se siente cuando están involucradas masas como la de la Tierra. Si estás de pie en un buque, la fuerza de atracción entre tú y el barco es muy débil para una medición ordinaria. Sin embargo, la fuerza de atracción entre tú y la Tierra puede medirse: es tu peso. Tu peso depende no sólo de tu masa, sino también de tu distancia respecto del centro de la Tierra. En lo alto de una montaña, tu masa es la misma que en cualquier otra parte, pero tu peso es un poco menor que a nivel del mar. Esto se debe a que tu distancia respecto del centro de la Tierra es mayor.

Una vez conocido el valor de $G$ la masa de la Tierra se calculó con facilidad. La fuerza que la Tierra ejerce sobre una masa de 1 kg en su superficie es 10 N (con mayor precisión, 9.8 N). La distancia entre la masa de 1 kg y el centro de la Tierra es el radio de la Tierra, $6.4 \times 10^6$ m. Por tanto, a partir de $F = G\frac{m_1 m_2}{d^2}$, donde $m_1$ es la masa de la Tierra,

$$9.8\ \text{N} = 6.67 \times 10^{-11}\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2\,\frac{1\ \text{kg} \times m_1}{\left(6.4 \times 10^6\ \text{m}\right)^2}$$

lo que conduce a $m_1 = 6 \times 10^{24}$ kg.

[3]El valor numérico de $G$ depende por completo de las unidades de medición que elijas para la masa, la distancia y el tiempo. El sistema internacional de elección es: para la masa, el kilogramo; para la distancia, el metro, y para el tiempo, el segundo. En el Apéndice A al final de este libro se discute la notación científica.

**FIGURA 9.3**
A medida que el cohete se aleja más de la Tierra, disminuye el tirón gravitacional de cada uno sobre el otro.

Así como una partitura guía a un músico para interpretar música, las ecuaciones guían a un estudiante de física que intenta entender cómo se conectan los conceptos.

**VIDEO: Método de von Jolly para medir la atracción entre dos masas**

**SCREENCAST: Gravedad**

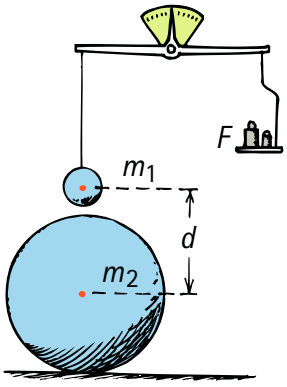



**FIGURA 9.4**
Método de Jolly para medir $G$. Las bolas de masa $m_1$ y $m_2$ se atraen mutuamente con una fuerza $F$ proporcionada por los pesos necesarios para restaurar el equilibrio.

Así como $\pi$ relaciona la circunferencia y el diámetro de un círculo, $G$ relaciona la fuerza gravitacional con la masa y la distancia.

En el siglo XVIII, cuando $G$ se midió por primera vez, la gente en todo el mundo se emocionó mucho. Eso fue porque los periódicos de todas partes anunciaron el descubrimiento como uno en el que se medía la masa del planeta Tierra. Qué emocionante que la ecuación de Newton proporcionara la masa de todo el planeta, con todos sus océanos, montañas y zonas recónditas aún por descubrir. El cálculo de $G$ y de la masa de la Tierra ocurrió cuando una gran parte de la superficie de la Tierra todavía estaba sin explorar.

**PUNTO DE CONTROL**

**Si existe una fuerza de atracción entre todos los objetos, ¿por qué no te sientes gravitar hacia los edificios masivos de tu vecindario?**

¡Nunca puedes cambiar sólo una cosa! Toda ecuación te lo recuerda: no puedes cambiar un término en un lado sin afectar el otro lado.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

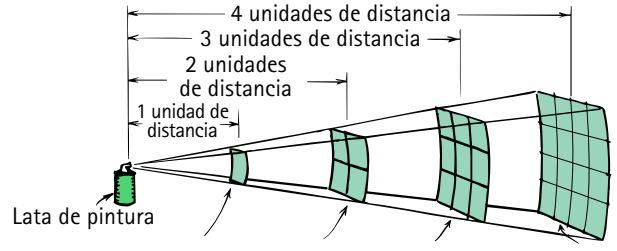
Sin duda la gravedad jala hacia los edificios masivos y todo lo demás en el Universo. Las fuerzas entre los edificios y tú son relativamente pequeñas porque sus masas son pequeñas comparadas con la masa de la Tierra. Las fuerzas debidas a las estrellas son extremadamente pequeñas por las grandes distancias que las separan de ti. Estas pequeñas fuerzas escapan a tu percepción cuando son superadas por la abrumadora atracción hacia la Tierra. El físico Paul A. M. Dirac, Premio Nobel 1933, lo dijo de esta forma: "¡corta una flor en la Tierra y moverás la estrella más lejana!".

## 9.3 Gravedad y distancia: la ley del inverso al cuadrado

**VIDEO: Ley del inverso al cuadrado**

Puedes comprender mejor cómo se debilita la gravedad con la distancia si piensas cómo la pintura de una lata se dispersa con la distancia (Figura 9.5). Imagina que colocas un aerógrafo en el centro de una esfera con un radio de 1 metro y un chorro de rocío de pintura viaja 1 m para producir un parche cuadrado de pintura que mide 1 mm de grosor. ¿Cuán grueso sería el parche si el experimento se realizara en una esfera con el doble de radio? Si la misma cantidad de pintura viaja en líneas rectas 2 m, se dispersará en un parche el doble de alto y el doble de ancho. Entonces la pintura se dispersaría sobre un área cuatro veces mayor y su grosor sería solamente de 1/4 mm.

¿Puedes ver en la figura que, para una esfera de 3 m de radio, el grosor del parche de pintura será solamente 1/9 mm? ¿Puedes ver que el grosor de la pintura disminuye a medida que aumenta el cuadrado de la distancia? Esto se conoce




| | 1 unidad de área | 4 unidades de área | ( ) unidades de área | ( ) unidades de área |
|---|---|---|---|---|
| Rocío de pintura | 1 grosor de la capa | 1/4 grosor de la capa | ( ) grosor de la capa | ( ) grosor de la capa |

**FIGURA 9.5**

La ley del inverso al cuadrado. El rocío de la pintura se aleja radialmente de la boquilla de la lata en líneas rectas. Al igual que la gravedad, la "fuerza" del aerosol obedece la ley del inverso al cuadrado.

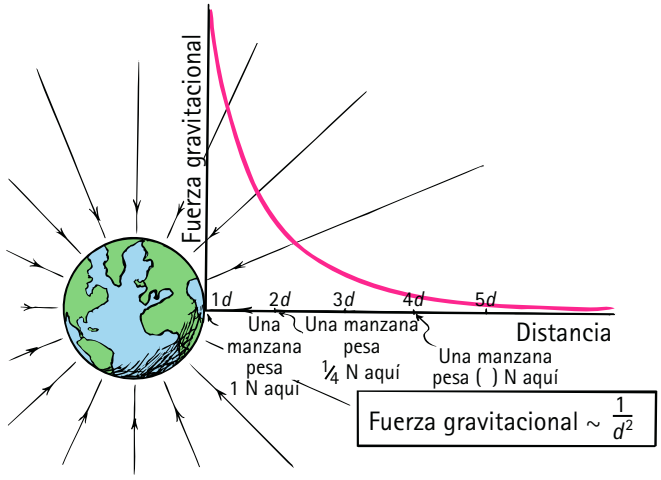



**FIGURA 9.6**
Si una manzana pesa 1 N en la superficie de la Tierra, pesaría solamente 1/4 N al doble de distancia del centro de la Tierra. A 3 veces la distancia, pesaría sólo 1/9 N. La fuerza gravitacional contra la distancia se indica en color. ¿Cuál sería el peso de la manzana a 4 veces la distancia? ¿A cinco veces la distancia?

como **ley del inverso al cuadrado**. La ley del inverso al cuadrado se sostiene para la gravedad y para todos los fenómenos en los que el efecto de una fuente localizada se dispersa de manera uniforme por el espacio circundante: el campo eléctrico en torno a un electrón aislado, la luz de un fósforo, la radiación de un trozo de uranio y el sonido de un grillo.

La ley de gravitación de Newton como se escribió se aplica a partículas y cuerpos esféricos, así como a cuerpos no esféricos suficientemente separados. El término de distancia *d* en la ecuación de Newton es la distancia entre los centros de masas de los objetos. Observa en la Figura 9.6 que la manzana que normalmente pesa 1 N en la superficie de la Tierra pesa solamente 1/4 de ello cuando está al doble de distancia del centro de la Tierra. Cuanto mayor sea la distancia respecto del centro de la Tierra, menor será el peso de un objeto. Un niño que pesa 300 N a nivel del mar sólo pesará 299 N en la cima del monte Everest. Para distancias mayores, la fuerza es menor. Para distancias muy grandes, la fuerza gravitacional de la Tierra tiende a cero. La fuerza *tiende* a cero mas nunca llega a cero. Incluso si fueras transportado a los confines lejanos del Universo, el campo gravitacional de casa aún seguiría contigo. Puede ser superado por los campos gravitacionales de cuerpos más cercanos o más masivos, pero está ahí. El campo gravitacional de todo objeto material, no importa cuán pequeño o cuán lejano, se extiende por todo el espacio.

## PUNTO DE CONTROL

1. **¿En cuánto disminuye la fuerza gravitacional entre dos objetos cuando la distancia entre sus centros se duplica? ¿Triplica? ¿Aumenta 10 veces?**
2. **Considera una manzana en lo alto de un árbol sobre el que jala la gravedad de la Tierra con una fuerza de 1 N. Si el árbol fuera el doble de alto, ¿la fuerza de gravedad será ¼ de intensa? Defiende tu respuesta.**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Disminuye a 1/4, 1/9 y 1/100 el valor original.
2. No, porque una manzana en lo alto de un árbol el doble de alto no está el doble de alejado del centro de la Tierra. El árbol más alto necesitaría una altura igual al radio de la Tierra (6,370 km) para que el peso de la manzana que está en su cima se redujera a ¼ N. Antes de que su peso disminuya 1%, una manzana o cualquier objeto deben elevarse 32 km, casi cuatro veces la altura del monte Everest. De modo que, con fines prácticos, se ignoran los efectos de los cambios cotidianos de elevación.

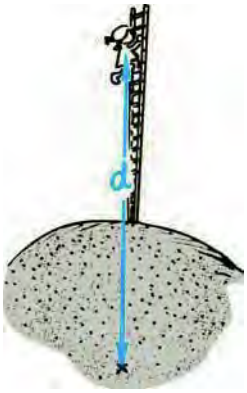



**FIGURA 9.7**
De acuerdo con la ecuación de Newton, el peso de la niña (no su masa) disminuye a medida que ella aumenta su distancia con respecto al centro de la Tierra.

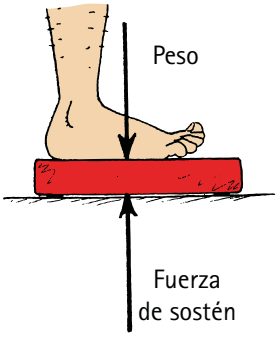



**FIGURA 9.8**
Cuando te subes a una báscula, dos fuerzas actúan sobre ella: una fuerza descendente de la gravedad, *mg*, y una fuerza de sostén ascendente. Estas dos fuerzas son iguales y opuestas cuando no ocurre aceleración, y oprimen un dispositivo similar a un resorte dentro de la báscula que está calibrado para mostrar tu peso.

Los astronautas en el interior de un vehículo espacial en órbita no tienen peso, aun cuando la fuerza de gravedad entre ellos y la Tierra sea sólo un poco menor que a nivel del suelo.

**VIDEO:** Ingravidez aparente

## 9.4 Peso e ingravidez

La fuerza de gravedad, como cualquier fuerza, puede producir aceleración. Los objetos bajo la influencia de la gravedad aceleran los unos hacia los otros. Puesto que tú casi siempre estás en contacto con la Tierra, la gravedad te es más familiar como algo que te presiona contra la Tierra en lugar de como algo que te acelera. La presión contra la Tierra es la sensación que interpretas como **peso**.

Párate sobre una báscula colocada en un suelo estacionario. La fuerza gravitacional entre tú y la Tierra te jala contra el suelo de apoyo y la báscula. De acuerdo con la tercera ley de Newton, al mismo tiempo, el suelo y la báscula te empujan hacia arriba. Entre tú y el suelo hay un dispositivo similar a un resorte en el interior de la báscula que está calibrado para mostrar tu peso (Figura 9.8, que es idéntica a la anterior Figura 4.6). Si repites este procedimiento de pesado en un elevador en movimiento, variará la lectura de tu peso: no durante el movimiento estable, sino durante el movimiento acelerado. Si el elevador acelera hacia arriba, la báscula y el suelo empujan más fuerte contra tus pies. De modo que la compresión de los resortes dentro de la báscula es mayor. La báscula muestra un aumento de tu peso. Sin embargo, si el elevador acelera hacia abajo, ocurre lo contrario y la báscula muestra una reducción de tu peso.

En los Capítulos 2 y 4, el peso de un objeto se consideró generalmente como la fuerza de la gravedad que jala sobre él. Cuando un objeto está en equilibrio sobre una superficie firme, su peso se evidencia por una fuerza de sostén o, cuando está en suspensión, por una tensión en la soga de soporte. En cualquier caso, sin aceleración, el peso es igual a *mg*. Sin embargo, cuando estudiaste los ambientes giratorios en el Capítulo 8, aprendiste que puede haber una fuerza de sostén sin importar la gravedad. De modo que una definición más amplia del peso experimentado por algo es *la fuerza que ejerce contra una superficie de sostén*. De acuerdo con esta definición, tú eres tan pesado como te sientes. De este modo, en un elevador que acelera hacia abajo, la fuerza de apoyo del suelo es menor y tú pesas menos. Si el elevador está en caída libre, la fuerza de sostén y la lectura sobre la báscula son cero. De acuerdo con la lectura, estás **ingrávido** (sin peso) (Figura 9.9). Sin embargo, incluso en esta condición de ingravidez todavía hay una fuerza gravitacional que actúa sobre ti, lo que causa tu aceleración hacia abajo. Pero ahora la gravedad no se siente como peso porque no hay fuerza de sostén.

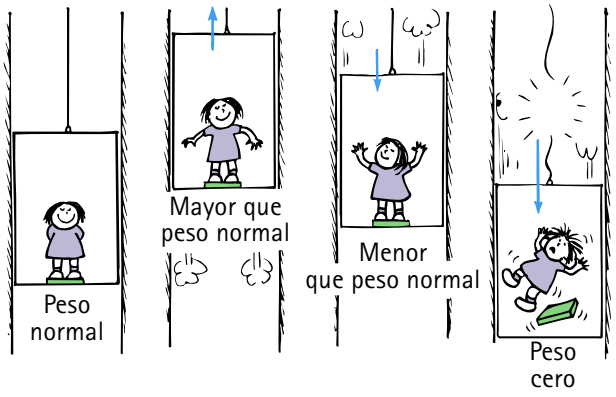



**FIGURA 9.9**
Tu peso es igual a la fuerza con la que presionas contra el suelo de apoyo. Si el suelo acelera hacia arriba o hacia abajo, tu peso varía (aun cuando la fuerza gravitacional *mg* que actúa sobre ti permanezca igual).

**VIDEO:** Peso e ingravidez

**SCREENCAST:** Peso/ingravidez

Los astronautas en órbita están sin una fuerza de apoyo. Están en un estado sostenido de *ingravidez,* que no es la ausencia de gravedad, sino la ausencia de una fuerza de sostén. En ocasiones los astronautas experimentan "mareo espacial" hasta que se acostumbran a un estado de ingravidez sostenida. Los astronautas en órbita están en un estado de caída libre continua.

La Estación Espacial Internacional que se muestra en la Figura 9.11 proporciona un ambiente de ingravidez. Las instalaciones de la estación y los astronautas aceleran de igual modo hacia la Tierra, a un poco menos que 1 *g* debido a su altitud. Esta aceleración

**FIGURA 9.10**
Estos astronautas están en caída libre. Se sienten ingrávidos porque no presionan contra algo que les proporcione una fuerza de apoyo.

**FIGURA 9.11**
Los habitantes de esta instalación de laboratorio y acoplamiento continuamente experimentan ingravidez. Están en caída libre alrededor de la Tierra. ¿Sobre ellos actúa una fuerza de gravedad?

no la perciben en absoluto; con respecto a la estación, los astronautas experimentan 0 *g*. Durante periodos prolongados, esto causa pérdida de tono muscular y otros cambios perjudiciales en el cuerpo. Sin embargo, los viajeros espaciales del futuro no necesitarán estar sujetos a ingravidez. Como se mencionó en el Capítulo 8, es probable que gigantescas ruedas o cápsulas que giren de manera lenta en el extremo de una cuerda de sujeción tomen el lugar de los actuales hábitats espaciales no giratorios. La rotación efectivamente proporciona una fuerza de soporte y brinda peso bastante bien.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿En qué sentido el estar a la deriva en el espacio, lejos de todo cuerpo celeste, es parecido a caer de una escalera?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

En ambos casos experimentas ingravidez. Al ir a la deriva en el espacio profundo, permaneces ingrávido porque ninguna fuerza discernible actúa sobre ti. Al caer de una escalera, sólo momentáneamente estás ingrávido, debido a una momentánea falta de fuerza de sostén.

**FIGURA 9.12**
Ambos están ingrávidos.

## 9.5 Mareas oceánicas

Las personas que viajan por mar siempre han sabido que hay una relación entre las mareas oceánicas y la Luna, pero ninguna podría ofrecer una teoría satisfactoria que explique las dos mareas altas por día. Newton produjo la explicación: las mareas oceánicas son causadas por *diferencias* en el tirón gravitacional entre la Luna y la Tierra sobre lados opuestos de la Tierra. La fuerza gravitacional entre la Luna y la Tierra es más fuerte en el lado de la Tierra más cercano a la Luna, y es más débil en el lado de la Tierra que está más lejos de la Luna. Esto es simplemente porque la fuerza gravitacional es más débil con la distancia creciente.

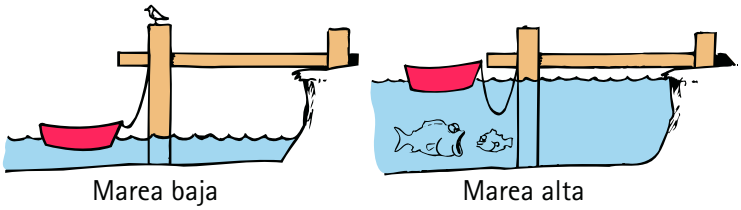



**FIGURA 9.13**
Mareas oceánicas.

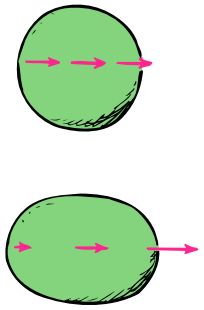


**FIGURA 9.14**
Una pelota de gelatina permanece esférica cuando todas las partes se jalan igualmente en la misma dirección. Cuando un lado se jala más que el otro, la pelota se estira.

**SCREENCAST: Mareas oceánicas**

Para comprender por qué estos diferentes tirones producen mareas, observa una pelota de gelatina (Figura 9.14). Si ejerces la misma fuerza sobre cada parte de la pelota, la pelota permanecería perfectamente redonda mientras acelera. Pero si tiras más fuerte de un lado que del otro, los diferentes tirones estirarán la pelota. Eso es lo que ocurre con esta gran bola sobre la que vives. Diferentes tirones de la Luna estiran la Tierra, de manera más notable en sus océanos. Este estiramiento es evidente en los abultamientos oceánicos en lados opuestos de la Tierra. Por tanto, se experimentan dos conjuntos de mareas oceánicas por día: dos mareas altas y dos mareas bajas.

En promedio mundial, los abultamientos oceánicos están casi 1 m arriba del nivel superficial promedio del océano. La Tierra gira una vez al día, de modo que un punto fijo sobre la Tierra pasa bajo estos dos abultamientos cada día. Esto produce dos conjuntos de mareas oceánicas por día. Cualquier parte de la Tierra que pasa por abajo de uno de los abultamientos tiene una marea alta. Cuando la Tierra realiza un cuarto de vuelta 6 horas después, el nivel del agua en la misma parte del océano está casi 1 m abajo del nivel marino promedio. Ésta es la marea baja. El agua que "no está ahí" está bajo los abultamientos que constituyen las mareas altas. Un segundo abultamiento de marea alta se experimenta cuando la Tierra da otro cuarto de vuelta. De modo que se tienen dos mareas altas y dos mareas bajas diariamente. Es interesante que mientras la Tierra gira, la Luna se mueve en su órbita y aparece en la misma posición en el cielo cada 24 horas y 50 minutos, de modo que el ciclo de dos mareas altas en realidad se produce a intervalos de 24 horas y 50 minutos. Es por esto que las mareas no ocurren al mismo tiempo cada día.

**FIGURA 9.15**
Los dos abultamientos de marea producidos por las diferencias en los tirones gravitacionales permanecen relativamente fijos en relación con la Luna, mientras que la Tierra gira diariamente bajo ellos.

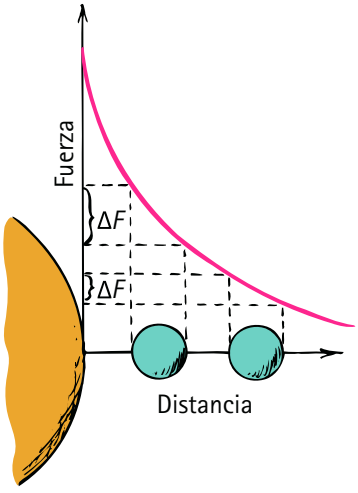



**FIGURA 9.16**
Gráfica de fuerza gravitacional contra distancia (no a escala). Cuanto mayor sea la distancia respecto del Sol, menor será la fuerza $F$, que varía como $1/d^2$ y menor la diferencia en tirones gravitacionales sobre lados opuestos de un planeta, $\Delta F$.

El Sol también contribuye a las mareas oceánicas, pero es aproximadamente la mitad de efectivo que la Luna para elevar mareas, aun cuando el tirón del Sol sobre la Tierra es 180 veces más fuerte que el tirón de la Luna sobre la Tierra. Entonces, ¿por qué las mareas debidas al Sol no son 180 veces mayores que las mareas debidas a la Luna? Debido a que el Sol está a una mayor distancia, la *diferencia* en tirones gravitacionales sobre lados opuestos de la Tierra es muy pequeña. En otras palabras, el Sol jala casi tan fuerte sobre el lado lejano de la Tierra que sobre el lado cercano.[4]

Cuando el Sol, la Tierra y la Luna se alinean, las mareas debidas al Sol y la Luna coinciden. Entonces se tienen mareas altas más altas que el promedio y mareas bajas más bajas que el promedio. A éstas se les conoce como **mareas vivas o de sicigia** (Figura 9.17). (Las mareas vivas o de sicigia no tienen nada que ver con la primavera.)* Es posible decir cuándo están alineados el Sol, la Tierra y la Luna gracias a la Luna llena o a la Luna nueva. Cuando la Luna es llena, la Tierra está entre el Sol y la Luna. (Si los tres están *exactamente* en línea, entonces se tiene un eclipse lunar, pues la Luna llena pasa por la sombra de la Tierra.) Una Luna nueva ocurre cuando la Luna está entre el Sol y la Tierra, cuando el hemisferio no iluminado de la Luna da la cara a la Tierra. (Cuando este alineamiento es perfecto, la Luna bloquea al Sol y se tiene un eclipse solar.) Las mareas vivas ocurren en épocas de Luna nueva o llena.

[4]Newton dedujo que las *diferencias* en los jalones de las mareas disminuyen como el *cubo* de la distancia entre los centros de los cuerpos. En consecuencia, sólo distancias relativamente cercanas resultan en mareas apreciables.
*N.T. El término en inglés para marea viva es *spring tide*, que podría traducirse como "marea de primavera", de ahí la aclaración del autor.

**FIGURA 9.17**
Cuando las atracciones del Sol y la Luna están alineadas mutuamente, ocurren mareas vivas.

Todas las mareas vivas no son igualmente altas porque las distancias Tierra-Luna y Tierra-Sol varían; las trayectorias orbitales de la Tierra y la Luna son elípticas en lugar de circulares. La distancia entre la Luna y la Tierra varía aproximadamente 10% y su efecto para subir las mareas varía en alrededor de 30%. Las mareas vivas más altas ocurren cuando la Luna y el Sol están más cerca de la Tierra.

Cuando la Luna está a la mitad de camino entre una Luna nueva y una Luna llena, en cualquier dirección (Figura 9.18), las mareas debidas al Sol y la Luna se cancelan parcialmente unas a otras. Entonces, las mareas altas son más bajas que el promedio y las mareas bajas no son tan bajas como las mareas bajas promedio. A éstas se les llama **mareas muertas o de cuadratura**.

**FIGURA 9.18**
Cuando las atracciones del Sol y la Luna están separadas unos 90° (en la época de la Luna media), ocurren mareas muertas.

Otro factor que afecta las mareas es la inclinación del eje de la Tierra (Figura 9.19). Aun cuando los abultamientos de marea opuestos sean iguales, la inclinación de la Tierra hace que las dos mareas altas diarias experimentadas en la mayor parte de los océanos sean distintas la mayor parte del tiempo.

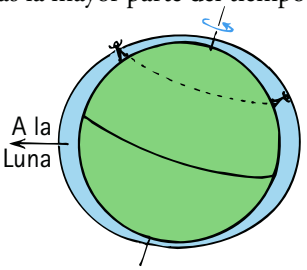



**FIGURA 9.19**
La desigualdad de las dos mareas altas por día. Debido a la inclinación de la Tierra, una persona puede descubrir que la marea más cercana a la Luna es mucho más baja (o más alta) que la marea medio día después. Las desigualdades de las mareas varían con las posiciones de la Luna y el Sol.

Las mareas no ocurren en los estanques porque ninguna parte del estanque está significativamente más cerca de la Luna o del Sol que otra parte. Sin diferencias en tirones, no se producen mareas. Lo mismo ocurre con los líquidos de tu cuerpo: cualquier marea en los líquidos de tu cuerpo que sea causada por la Luna es despreciable. Uno no es lo suficientemente alto como para tener mareas. Cualquier micromarea que la Luna pueda producir en tu cuerpo sólo es de cerca de un ducentésimo las mareas producidas por un melón de 1 kg sostenido 1 m arriba de tu cabeza (Figura 9.20).

El tratamiento que aquí se da a las mareas está muy simplificado; las mareas en realidad son más complicadas. Las masas continentales que interfieren y la fricción con el fondo marino, por ejemplo, complican los movimientos de las mareas. En muchos lugares, las mareas se descomponen en "cuencos de circulación" más pequeños, donde un abultamiento de marea viaja como una onda en circulación que se mueve en un pequeño cuenco de agua que está inclinado. Por esta razón, la marea alta puede estar a horas de distancia del momento en que la Luna está en lo alto del cielo. A mitad del océano, donde el rango entre mareas alta y baja por lo general es de alrededor de un metro, las variaciones en rango ocurren en diferentes partes del mundo. El rango es más grande en algunos fiordos de Alaska y es más notable en la cuenca de la Bahía de Fundy, entre New Brunswick y Nova Scotia en el este de Canadá, donde las diferencias en mareas en ocasiones superan los 15 m. Esto se debe principalmente al suelo marino, que forma un embudo hacia la costa en forma de V. Con frecuencia, la marea llega más rápido de lo que puede correr una persona. ¡Nunca busques almejas cerca del borde del agua en la marea baja en la Bahía de Fundy!

**FIGURA 9.20**
La diferencia en fuerza de mareas debida a un cuerpo de 1 kg colocado 1 m por arriba de la cabeza de una persona de estatura promedio es de aproximadamente 60 billonésimos ($6 \times 10^{-11}$) N/kg. Para una Luna sobre la cabeza, es de aproximadamente 0.3 billonésimos ($3 \times 10^{-13}$) N/kg. De modo que sostener un melón sobre tu cabeza produce aproximadamente 200 veces más efecto de marea en tu cuerpo que la Luna.

**PUNTO DE CONTROL**

**Se sabe que tanto la Luna como el Sol producen mareas oceánicas. Y se sabe que la Luna tiene el papel principal debido a su cercanía. ¿Esta cercanía de la Luna significa que jala sobre los océanos de la Tierra con más fuerza gravitacional que el Sol?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**
No, el tirón del Sol es mucho más fuerte. Pero la *diferencia* en los tirones lunares es más grande que la *diferencia* en los tirones solares. De modo que las mareas se deben principalmente a la Luna.

## Mareas en la Tierra y la atmósfera

Además de las mareas oceánicas, la Luna y el Sol producen mareas atmosféricas: más altas y después más bajas durante una Luna llena. ¿Esto explica por qué algunos de tus amigos se alocan cuando la Luna está llena?

La Tierra no es un sólido rígido sino, en su mayor parte, es un líquido semifundido cubierto por una delgada corteza, sólida y plegable. Como resultado, las fuerzas de la marea Luna-Sol producen mareas de la Tierra así como mareas oceánicas. Dos veces al día, ¡la superficie sólida de la Tierra se eleva y cae hasta ¼ m! Como resultado, los terremotos y las erupciones volcánicas tienen una probabilidad un poco más alta de ocurrir cuando la Tierra experimenta una marea viva de Tierra; esto es: cerca de una Luna llena o nueva.

Vives en el fondo de un océano de aire que también experimenta mareas. Al estar en el fondo de la atmósfera, no percibes dichas mareas (tal como las criaturas en aguas profundas probablemente no perciben las mareas de los océanos). En la parte superior de la atmósfera está la ionosfera, llamada así porque contiene muchos iones: átomos con carga eléctrica que son resultado de la luz ultravioleta y el intenso bombardeo de rayos cósmicos. Los efectos de marea en la ionosfera producen corrientes eléctricas que alteran el campo magnético que rodea la Tierra. Éstas son mareas magnéticas. Ellas, a su vez, regulan el grado al que los rayos cósmicos penetran en la atmósfera inferior. La penetración de los rayos cósmicos es evidente en los cambios sutiles de comportamiento de los organismos vivos. Las altas y bajas de las mareas magnéticas son mayores cuando la atmósfera tiene sus mareas vivas, nuevamente, cerca de las lunas llena y nueva.

## Abultamientos de marea en la Luna

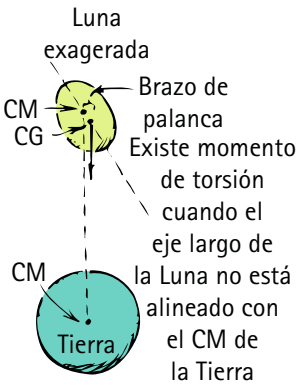



**FIGURA 9.21**
El tirón de la Tierra sobre la Luna en su centro de gravedad produce un momento de torsión en torno al centro de masa de la Luna, que tiende a rotar el eje largo de la Luna para alinearse con el campo gravitacional de la Tierra (como la aguja de una brújula que se alinea con un campo magnético). Es por eso que sólo un lado de la Luna mira a la Tierra.

En la Luna existen dos abultamientos de marea por la misma razón que hay dos abultamientos de marea sobre la Tierra: los lados cercano y lejano de cada cuerpo son jalados de manera diferente. De modo que la Luna es jalada y pierde un poco la forma esférica para adoptar una forma de balón de fútbol, con su eje largo apuntando hacia la Tierra. Pero, a diferencia de las mareas de la Tierra, los abultamientos de marea permanecen en posiciones fijas, sin subida ni bajada "diaria" de mareas de la Luna. Dado que la Luna tarda 27.3 días en dar una sola revolución en torno a su propio eje (y también en torno al eje Tierra-Luna), el mismo hemisferio lunar se presenta a la Tierra en todo momento. Esto no es coincidencia; sucede porque el alargado centro de gravedad de la Luna se desplaza ligeramente de su centro de masa. De modo que, siempre que el eje largo de la Luna no esté alineado hacia la Tierra (Figura 9.21), la Tierra ejerce un pequeño momento de torsión sobre la Luna. Esto tiende a hacer girar la Luna para alinearse con el campo gravitacional de la Tierra, como el momento de torsión que alinea la aguja de una brújula con un campo magnético. Ahora ves que hay una razón por la que la Luna siempre muestra su misma cara.

Es bastante interesante que esta "cerradura de marea" también funcione para la Tierra. Los días terrestres se hacen más largos, a razón de 2 milisegundos por siglo. En unos miles de millones de años, el día será tan largo como un mes, y la Tierra siempre mostrará la misma cara a la Luna. ¡Qué tal eso!

# 9.6 Campos gravitacionales

La Tierra y la Luna jalan una sobre la otra. Esto es una *acción a distancia* porque Tierra y Luna interactúan sin estar en contacto. Es posible ver esto de un modo distinto: puedes considerar que la Luna está en contacto y en interacción con el *campo gravitacional* de la Tierra. Se puede considerar que las propiedades del espacio que rodea a cualquier cuerpo masivo se alteran de un modo tal que otro cuerpo masivo en esta

región experimenta una fuerza. Esta alteración del espacio es un **campo gravitacional**. Suele pensarse que los cohetes y sondas del espacio distante están influidos por el campo gravitacional de sus ubicaciones en el espacio, y no por la Tierra u otros planetas o estrellas. El concepto de campo tiene un papel intermedio cuando se piensa en las fuerzas entre diferentes masas.

Un campo gravitacional es un ejemplo de *campo de fuerza,* pues cualquier cuerpo con masa experimenta una fuerza en el campo. Otro campo de fuerza, acaso más familiar, es el campo magnético. ¿Alguna vez has visto limaduras de hierro alineadas en patrones alrededor de un imán? (Observa por adelantado la Figura 24.2 de la página 455.) El patrón de las limaduras muestra la intensidad y la dirección del campo magnético en diferentes puntos en el espacio alrededor del imán. Donde las limaduras están más juntas, el campo es más intenso. La dirección de las limaduras muestra la dirección del campo en cada punto.

El patrón del campo gravitacional de la Tierra puede representarse con líneas de campo (Figura 9.22). Al igual que las limaduras de hierro alrededor de un imán, las líneas de campo están más juntas donde el campo gravitacional es más fuerte. En cada punto sobre una línea de campo, la dirección del campo es a lo largo de la línea. Las flechas muestran la dirección del campo. Una partícula, un astronauta, una nave espacial o cualquier cuerpo en la vecindad de la Tierra se acelerará en la dirección de la línea de campo en dicha ubicación.

La intensidad del campo gravitacional de la Tierra, como la intensidad de su fuerza sobre los objetos, sigue la ley del inverso al cuadrado. Es más intenso cerca de la superficie de la Tierra y se debilita con la distancia creciente respecto de la Tierra.[5]

El campo gravitacional en la superficie de la Tierra varía un poco de una ubicación a otra. Arriba de grandes depósitos subterráneos de plomo, por ejemplo, el campo es ligeramente más intenso que el promedio. Arriba de grandes cavernas, el campo es un poco más débil. Para predecir qué se encuentra bajo la superficie de la Tierra, los geólogos y buscadores de petróleo y minerales toman mediciones precisas del campo gravitacional de la Tierra.

## Campo gravitacional en el interior de un planeta[6]

El campo gravitacional de la Tierra existe tanto adentro como fuera de ella. Imagina que se taladra un agujero que atraviesa por completo la Tierra, desde el Polo Norte hasta el Polo Sur. Olvídate de cosas imprácticas, como el interior fundido a alta temperatura, mejor piensa en el movimiento que experimentarías si cayeras en tal agujero. Si comienzas en el extremo del Polo Norte, caerías y ganarías rapidez conforme cayeras hacia el centro, luego perderías rapidez en el camino de "subida" al Polo Sur. Sin arrastre aerodinámico, el viaje en un sentido tardaría casi 45 minutos. Si no pudieras sujetarte en el borde del agujero cuando llegues al Polo Sur, caerías de vuelta hacia el centro y regresarías al Polo Norte en el mismo tiempo.

Tu aceleración, $a$, será progresivamente menor conforme continúes hacia el centro de la Tierra. ¿Por qué? Porque, a medida que caes hacia el centro de la Tierra, hay menos masa que te jale hacia el centro y más masa sobre ti que te jale de vuelta hacia arriba. Cuando estás en el centro de la Tierra, el tirón hacia abajo se equilibra con el tirón hacia arriba, de modo que la fuerza neta sobre ti mientras zumbas con máxima rapidez por el centro de la Tierra es cero. Es correcto: ¡tienes máxima velocidad y mínima aceleración en el centro de la Tierra! ¡El campo gravitacional de la Tierra en su centro es cero![7]

[5]La intensidad del campo gravitacional $g$ en cualquier punto es igual a la fuerza $F$ por unidad de masa colocada ahí. De modo que $g = F/m$ y sus unidades son newtons por kilogramo (N/kg). El campo $g$ también es igual a la aceleración de caída libre de la gravedad. Las unidades N/kg y m/s$^2$ son equivalentes.

[6]Esta sección puede saltarse para un breve tratamiento de los campos gravitacionales.

[7]Es muy interesante que, durante los primeros kilómetros bajo la superficie de la Tierra, en realidad ganarías aceleración porque la densidad del centro compacto es mucho mayor que la densidad del material de la superficie. De modo que la gravedad sería ligeramente más fuerte durante la primera parte de una caída. Más adentro, la gravitación se reduciría y disminuiría hasta cero en el centro de la Tierra.

**SCREENCAST: Gravedad en el interior de la Tierra**

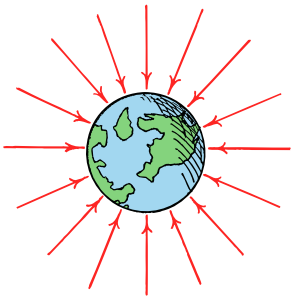


**FIGURA 9.22**
Líneas de campo que representan el campo gravitacional alrededor de la Tierra. Donde las líneas de campo están más juntas, el campo es más fuerte. Más lejos, donde las líneas de campo están más separadas, el campo es más débil.

**SCREENCAST: Túnel a través de la Tierra**

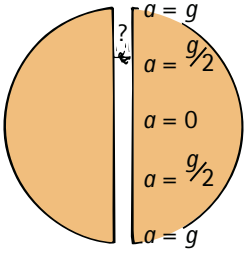



**FIGURA 9.23**
A medida que caes cada vez más y más rápido en un agujero perforado que atraviesa toda la Tierra, tu aceleración disminuye porque la parte de la masa de la Tierra abajo de ti se vuelve cada vez más pequeña. Menos masa significa menos atracción hasta que, en el centro, donde eres empujado igualmente en todas direcciones, tanto la fuerza neta como la aceleración son cero. La cantidad de movimiento te lleva a pasar por el centro y, contra una aceleración creciente, hacia el extremo opuesto del túnel, donde la aceleración nuevamente es $g$, dirigida de vuelta hacia el centro.

Neil deGrasse Tyson describe muy bien un escenario de caída a través de la Tierra en *NOVA*.

La composición de la Tierra varía; es más densa en su núcleo y menos densa en la superficie. Sin embargo, dentro de un planeta hipotético con densidad uniforme, el campo interior aumenta linealmente (esto es: a una tasa estable) desde cero en su centro hasta $g$ en la superficie. En este libro no se dirá por qué, pero tal vez tu instructor te dé la explicación. En cualquier caso, en la Figura 9.24 se muestra una gráfica de la intensidad del campo gravitacional dentro y fuera de un planeta sólido con densidad uniforme.

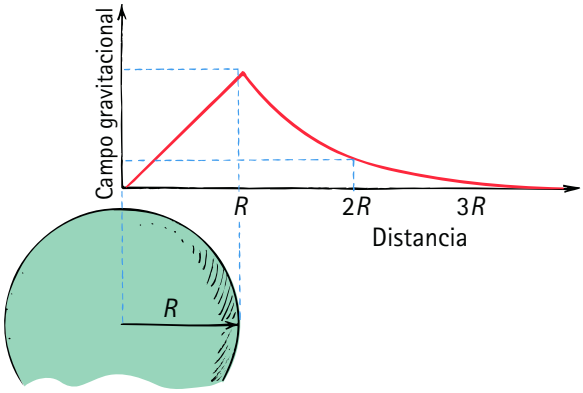



**FIGURA 9.24**
La intensidad del campo gravitacional dentro de un planeta con densidad uniforme es directamente proporcional a la distancia radial desde su centro y es máxima en su superficie. En el exterior, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde su centro.

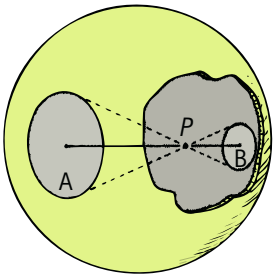



**FIGURA 9.25**
El campo gravitacional en cualquier parte del interior de un cascarón esférico con grosor y composición uniformes es cero, porque los componentes del campo provenientes de todas las partículas de masa del cascarón se cancelan entre sí. Una masa en el punto $P$, por ejemplo, es atraída con la misma intensidad a la región más grande pero más lejana A que hacia la región B más pequeña pero más cercana.

Imagina una caverna esférica en el centro de un planeta. La caverna no tendría gravedad debido a la cancelación de las fuerzas gravitacionales en toda dirección. Sorprendentemente, el tamaño de la caverna no cambia este hecho, ¡incluso aunque constituyera la mayor parte del volumen del planeta! Un planeta hueco, como un enorme balón de básquetbol, no tendría campo gravitacional en ninguna parte de su interior. La cancelación completa de las fuerzas gravitacionales ocurre en todas partes en su interior. Para ver por qué, considera la partícula $P$ de la Figura 9.25, que está al doble de distancia del lado izquierdo del planeta que del derecho. Si la gravedad dependiera sólo de la distancia, $P$ para abarcar la región A en la figura y un cono con igual ángulo que llega a la derecha para abarcar la región B. La región A tiene 4 veces el área y, por tanto, 4 veces la masa de la región B. Dado que 1/4 de 4 es igual a 1, $P$ es atraído hacia la región A más lejana pero más masiva justo con tanta fuerza como si estuviera en la región B más cercana pero menos masiva. Hay cancelación. Un razonamiento más profundo mostrará que la cancelación ocurre en cualquier parte dentro de un cascarón planetario que tenga densidad y grosor uniformes. Un campo gravitacional existe dentro y fuera del cascarón. En su superficie exterior y en el espacio lejano, el campo gravitacional es el mismo como si toda la masa del planeta estuviese concentrada en su centro. En todas partes dentro de la parte hueca, el campo gravitacional es cero. Cualquier persona en su interior tendría ingravidez. ¡A esto el autor le llama física "sabrosa"!

**VIDEO: Campo gravitacional en el interior de un planeta hueco**

**VIDEO: Peso de un objeto en el interior de un planeta hueco mas no en su centro**

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Supón que caes en un agujero que se taladró justo en el centro de la Tierra y no intentas asirte de los bordes de ningún extremo. Si desprecias el arrastre aerodinámico, ¿qué tipo de movimiento experimentarías?**
2. **A la mitad del camino hacia el centro de la Tierra, ¿la fuerza de gravedad sobre ti sería menor que en la superficie de la Tierra?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Oscilarías de ida y vuelta. Si la Tierra fuera una esfera ideal de densidad uniforme y no hubiera arrastre aerodinámico, tu oscilación sería lo que se llama *movimiento armónico simple.* Cada viaje redondo tardaría casi 90 minutos. En el Capítulo 10 verás que un satélite terrestre en órbita cercana alrededor de la Tierra también tarda 90 minutos en dar una vuelta completa. (Esto no es coincidencia: si estudias más física, aprenderás que el movimiento armónico simple "de ida y vuelta" sólo es el componente vertical del movimiento circular uniforme... un asunto interesante.)
2. La fuerza gravitacional sobre ti sería menor, porque hay menos masa de Tierra abajo de ti, que jala sobre ti con menos fuerza. Si la Tierra fuera una esfera uniforme con densidad uniforme, la fuerza gravitacional a la mitad de camino hacia el centro sería exactamente la mitad que en la superficie. Pero dado que el núcleo de la Tierra es tan denso (unas siete veces la densidad de la roca superficial), la fuerza gravitacional a la mitad sería un poco más que la mitad. La cifra exacta depende de cómo varíe la densidad de la Tierra con la profundidad, que es información que no se conoce en la actualidad.

Aunque la gravedad puede cancelarse dentro de un cuerpo o entre cuerpos, no puede blindarse en la misma forma que puede hacerse con las fuerzas eléctricas. En el Capítulo 22 verás que las fuerzas eléctricas pueden repelerse así como atraerse, lo que hace posible el blindaje. Pero, dado que la gravitación sólo atrae, no puede haber un tipo similar de blindaje. Los eclipses ofrecen evidencias convincentes de esto. La Luna está en el campo gravitacional tanto del Sol como de la Tierra. Durante un eclipse lunar, la Tierra está directamente entre la Luna y el Sol, y cualquier blindaje del campo del Sol por parte de la Tierra resultaría en una desviación de la órbita de la Luna. Incluso un muy ligero efecto de blindaje se acumularía en el transcurso de algunos años y se mostraría en el cálculo del momento de los eclipses posteriores. Pero no ha habido tales discrepancias; los eclipses pasados y futuros se calculan con un alto grado de exactitud tan sólo con el uso de la simple ley de gravitación. Jamás se ha encontrado un efecto de blindaje en la gravedad.

## Teoría de gravitación de Einstein

En la primera parte del siglo XX, Einstein presentó, en su teoría de relatividad general, un modelo de gravedad muy distinto al de Newton. Einstein percibió un campo gravitacional como una distorsión geométrica del espacio-tiempo 4-dimensional; se dio cuenta de que los cuerpos hacen abolladuras en el espacio y tiempo en forma parecida a como una bola masiva colocada en medio de una cama de agua abolla la superficie bidimensional (Figura 9.26). Cuanto más masiva sea la bola, más grande será la abolladura o distorsión. Si una canica rueda sobre la parte superior de la cama, pero muy alejada de la bola, la canica rodará en una trayectoria en línea recta. Pero si la canica rueda cerca de la bola, se curvará a medida que ruede por la superficie abollada de la cama de agua. Si la curva se cierra sobre sí misma, la canica orbitará la bola o en una trayectoria oval o en una circular. Si te pones tus gafas newtonianas, de modo que veas la bola y la canica mas no la cama, puedes concluir que la canica se curva porque es atraída hacia la bola. Si te pones tus gafas einsteinianas, de modo que veas la canica y la cama de agua abollada mas no la bola "distante", probablemente concluirías que la canica se curva porque la superficie sobre la cual se mueve es curva, en dos dimensiones para la cama de agua y en cuatro dimensiones para espacio y tiempo.[8] En el Capítulo 36 se abordará la teoría de la gravitación de Einstein con más detalle.

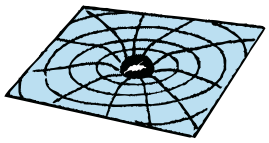


**FIGURA 9.26**
Espacio-tiempo distorsionado. El espacio-tiempo cerca de una estrella se curva en cuatro dimensiones en forma similar a la superficie bidimensional de una cama de agua cuando una bola pesada descansa sobre ella.

[8]No te desalientes si no puedes visualizar el espacio-tiempo 4-dimensional. El mismo Einstein con frecuencia decía a sus amigos: "No lloren. Yo tampoco puedo hacerlo". ¡Acaso no seas tan diferente de los grandes pensadores en torno a Galileo que no podían concebir una Tierra en movimiento!

## 9.7 Agujeros negros

Supón que eres indestructible y puedes viajar en una nave espacial a la superficie de una estrella. Tu peso en la estrella dependería de tu masa, de la masa de la estrella y de la distancia entre el centro de la estrella y tu centro de masa. Si la estrella se apagara y colapsara a la mitad de su radio sin cambio en su masa, tu peso en su superficie, determinado por la ley del inverso al cuadrado, sería cuatro veces mayor (Figura 9.27). Si la estrella colapsara a un décimo de su radio, tu peso en su superficie sería 100 veces mayor. Si la estrella siguiera encogiéndose, el campo gravitacional en la superficie se volvería más intenso. Cada vez sería más difícil que partiera una nave espacial. La velocidad necesaria para escapar, la *velocidad de escape,* aumentaría. Si una estrella como el Sol colapsara a un radio de menos de 3 km, la velocidad de escape de su superficie superaría la rapidez de la luz, ¡y nada, ni siquiera la luz, podría escapar! El Sol sería invisible. Sería un **agujero negro**.

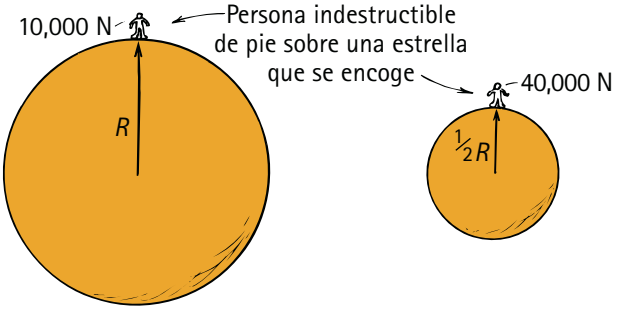



**FIGURA 9.27**
Si una estrella colapsa a la mitad de su radio y no hay cambio en su masa, la gravedad en su superficie se multiplica por 4.

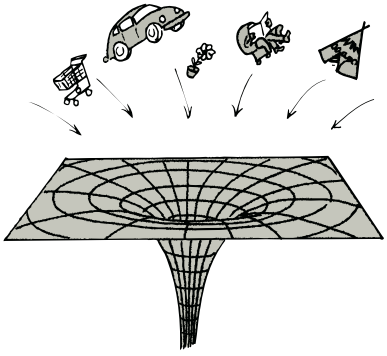


**FIGURA 9.28**
Todo lo que cae en un agujero negro deja de existir. El agujero negro sólo conserva la masa, la cantidad de movimiento angular y la carga eléctrica.

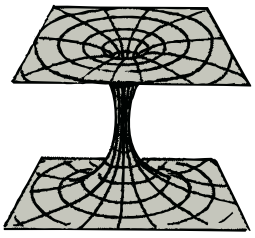


**FIGURA 9.29**
Un agujero de gusano especulativo puede ser la entrada hacia otra parte del Universo o incluso a otro Universo.

El Sol, de hecho, tiene muy poca masa para experimentar tal colapso, pero cuando algunas estrellas con masas mayores, ahora estimadas en al menos 1.5 masas solares o más, llegan al final de sus recursos nucleares, experimentan colapso y, a menos que la rotación sea suficientemente rápida, el colapso continúa hasta que las estrellas llegan a densidades infinitas. La gravedad cerca de estas estrellas encogidas es tan enorme que la luz no puede escapar de su vecindad. Se comprimen hasta quedar fuera de la existencia visible. Los resultados son los agujeros negros, que son completamente invisibles.

Un agujero negro no es más masivo que la estrella de la cual colapsó, de modo que el campo gravitacional en regiones que están en el radio de la estrella original, y más grandes que él, no es diferente después de que la estrella colapsa que antes. Pero, a distancias más cercanas a la vecindad de un agujero negro, el campo gravitacional puede ser enorme, una distorsión circundante en la que todo lo que pasa muy cerca (luz, polvo o una nave espacial) son succionados. Los astronautas podrían entrar en los límites de esta distorsión y, si estuvieran en una poderosa nave espacial, todavía podrían escapar. Sin embargo, una vez dentro de cierta distancia, no podrían escapar y desaparecerían del Universo observable. Cualquier objeto que cayera en un agujero negro sería despedazado. Ninguna característica del objeto sobreviviría, excepto su masa, su cantidad de movimiento angular (si tuviera alguna) y su carga eléctrica (si tuviera alguna).

Una entidad teórica que tiene ciertas similitudes con el agujero negro es el "agujero de gusano" (Figura 9.29). Al igual que un agujero negro, un agujero de gusano es una enorme distorsión del espacio y el tiempo. Pero, en lugar de colapsar hacia un punto infinitamente denso, el agujero de gusano se abre en alguna otra parte del Universo, ¡o incluso, plausiblemente, en algún otro Universo! Mientras que la existencia de los agujeros negros se ha confirmado, el agujero de gusano sigue siendo una noción excesivamente especulativa. Algunos aficionados a la ciencia imaginan que el agujero de gusano abre la posibilidad de los viajes en el tiempo.[9]

¿Cómo puede detectarse un agujero negro si literalmente no hay forma de "verlo"? Se hace sentir mediante su influencia gravitacional sobre la materia cercana y sobre las

[9]Stephen Hawking, un experto pionero en los agujeros negros, fue uno de los primeros en especular sobre la existencia de los agujeros de gusano. Pero, en 2003, para consternación de muchos aficionados a la ciencia, anunció su convicción de que no pueden existir.

estrellas vecinas. Hay buena evidencia de que algunos sistemas de estrellas binarias consisten en una estrella luminosa y una compañera invisible con propiedades parecidas a las de un agujero negro orbitando uno alrededor de la otra. Incluso la evidencia más fuerte apunta a agujeros negros más masivos en los centros de muchas galaxias (acaso de todas las galaxias). En una galaxia joven, observada como "quásar", el agujero negro central succiona materia que emite grandes cantidades de radiación mientras se zambulle en el olvido. En algunas galaxias más viejas se observan estrellas que hacen círculos en poderosos campos gravitacionales alrededor de centros aparentemente vacíos. Estos agujeros negros galácticos tienen masas que varían de millones a más de mil millones de veces la masa del Sol. El centro de la Vía Láctea, aunque no tan fácil de ver como los centros de algunas otras galaxias, casi seguramente alberga un agujero negro con una masa de 4 millones de masas solares. Los descubrimientos están surgiendo más rápido de lo que los libros de texto pueden informar. Revisa en tu sitio web de astronomía las actualizaciones más recientes.

**pti**

- Contrario a las historias acerca de los agujeros negros, no son agresivos ni alcanzan y tragan inocentes a distancia. Sus campos gravitacionales no son más intensos que los campos originales en torno a las estrellas antes de colapsar, excepto a distancias menores que el radio original de la estrella. A menos que estén muy cerca, los agujeros negros no deberían preocupar a los futuros astronautas.

## 9.8 Gravitación universal

Todo mundo sabe que la Tierra es redonda. Pero, ¿por qué la Tierra es redonda? Es redonda debido a la gravedad. Todo atrae a todo lo demás, ¡y así la Tierra se atrae a ella misma tanto como puede! Cualquier "esquina" de la Tierra se ha jalado hacia adentro; como resultado, toda parte de la superficie es equidistante del centro de gravedad. Esto la hace una esfera. Por tanto, de acuerdo con la ley de gravitación, se ve que el Sol, la Luna y la Tierra son esféricos porque tienen que serlo (aunque los efectos rotacionales los hacen un poco elipsoidales).

Una esfera tiene el área superficial más pequeña de cualquier volumen de materia.

Si todo jala sobre todo lo demás, entonces los planetas deben jalar unos sobre otros. La fuerza que controla a Júpiter, por ejemplo, no es sólo la fuerza del Sol; también hay tirones de los otros planetas. Sus efectos son pequeños en comparación con el tirón del Sol mucho más masivo, pero aun así se ven. Por ejemplo, Saturno jala sobre Júpiter, lo que perturba la de otro modo suave trayectoria de Júpiter, y Júpiter hace lo mismo con Saturno. Ambos planetas "se bambolean" en sus órbitas. Las fuerzas interplanetarias que causan este bamboleo se llaman *perturbaciones.*

Hacia la década de 1840, los estudios del planeta recién descubierto en esa época, Urano, mostraban que las desviaciones de su órbita no podían explicarse con las perturbaciones de todos los demás planetas conocidos. O la ley de gravitación fallaba a esta gran distancia del Sol o un octavo planeta desconocido perturbaba la órbita de Urano. Un inglés, J. C. Adams, y un francés, Urbain Leverrier, supusieron cada uno que la ley de Newton era válida y de manera independiente calcularon dónde debería estar un octavo planeta. Casi al mismo tiempo, Adams envió una carta al Observatorio de Greenwich en Inglaterra y Leverrier envió una carta al Observatorio de Berlín en Alemania, y ambos sugerían buscar el nuevo planeta en cierta área del cielo. La solicitud de Adams fue retrasada por malas interpretaciones en Greenwich, pero la solicitud de Leverrier fue atendida de inmediato. ¡Esa misma noche se descubrió el planeta Neptuno!

Un rastreo posterior de las órbitas de Urano y Neptuno condujo a la predicción y descubrimiento de Plutón en 1930 en el Observatorio Lowell en Arizona. Independientemente de cualquier cosa que hayas aprendido antes, los astrónomos ahora consideran a Plutón como un *planeta enano*, una nueva categoría que incluye ciertos asteroides en

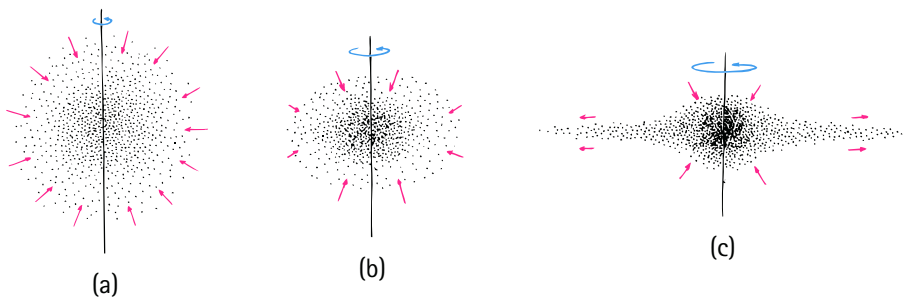



**FIGURA 9.30**
Formación del sistema solar. Una bola de gas interestelar ligeramente en rotación (a) se contrae debido a gravitación mutua y entonces (b) conserva cantidad de movimiento angular al acelerar. El aumento de la cantidad de movimiento de partículas individuales y conglomerados de partículas hace que (c) se dispersen en trayectorias más anchas en torno al eje rotacional, lo que produce una forma global de disco. La mayor área superficial del disco favorece el enfriamiento y la condensación de materia en remolinos giratorios: el nacimiento de los planetas.

el cinturón Kuiper. Sin importar su categoría, Plutón tarda 248 años en hacer una sola revolución alrededor del Sol, de modo que nadie lo volverá a ver en la posición en que fue descubierto sino hasta el año 2178.

Hay datos recientes que sugieren que el Universo no sólo se expande sino que *acelera* hacia afuera, empujado por una *energía oscura* antigravedad que constituye 73% del Universo. Además, la velocidad a la que las estrellas dan vueltas dentro de las galaxias sugiere que no sólo jalan sobre ellas las masas de las estrellas visibles; también hay un jalón de algún nuevo tipo de materia invisible, llamada *materia oscura*, que constituye 23% del Universo. La materia ordinaria, el material de las estrellas, los repollos y los reyes, constituye sólo alrededor de 4%. Los conceptos de energía oscura y materia oscura son descubrimientos de finales del siglo XX y principios del XXI. La manera de ver el Universo en la actualidad ha avanzado mucho y ha dejado atrás el Universo que Newton observaba.

Sin embargo, pocas teorías han influido tanto en la ciencia y la civilización como la teoría de Newton de la gravedad. Las ideas de Newton verdaderamente cambiaron al mundo y elevaron la condición humana. Los éxitos de las ideas de Newton inauguraron la Era de la Razón. Newton demostró que, mediante observación y razonamiento, las personas podían revelar el funcionamiento del universo físico. Cuán profundo es que todas las lunas, los planetas, las estrellas y las galaxias tengan una regla tan hermosamente simple que las gobierne, a saber,

$$F = G\frac{m_1 m_2}{d^2}$$

La formulación de esta sencilla regla es una de las principales razones del éxito que siguió en la ciencia, pues brindó la esperanza de que otros fenómenos del mundo también pudieran describirse con leyes igual de sencillas y universales.

Esta esperanza nutrió el pensamiento de muchos científicos, artistas, escritores y filósofos del siglo XVIII. Uno de ellos fue el filósofo inglés John Locke, quien afirmó que la observación y la razón, como lo demostró Newton, deben ser el mejor juez y guía en todas las cosas. Locke exhortó a buscar y descubrir en toda la naturaleza, e incluso en la sociedad, cualesquiera "leyes naturales" que pudieran existir. Al usar la física newtoniana como modelo de razonamiento, Locke y sus seguidores crearon un sistema de gobierno que encontró seguidores en las 13 colonias británicas al otro lado del Atlántico. Dichas ideas culminaron en la Declaración de Independencia y en la Constitución de los Estados Unidos de América.

**pti**

- Una idea muy difundida es que, cuando la Tierra dejó de considerarse el centro del Universo, su lugar y la humanidad descendieron de categoría y ya no se consideraron especiales. Por el contrario, escritos de la época sugieren que la mayoría de los europeos opinaba que los seres humanos eran sucios y pecadores por la baja posición de la Tierra: más lejos de los cielos, con el infierno en su centro. La elevación humana no ocurrió sino hasta que el Sol, visto positivamente, asumió una posición central. La humanidad se volvió especial cuando mostró que no era tan especial.

**VIDEO: Descubrimiento de Neptuno**

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Ley de gravitación universal.** Todo cuerpo en el Universo atrae a todos los demás cuerpos con una fuerza que, para dos cuerpos, es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{d^2}$$

**Ley del inverso al cuadrado.** Ley que relaciona la intensidad de un efecto con el inverso del cuadrado de la distancia desde la causa. La gravedad sigue una ley del inverso al cuadrado, como lo hacen los efectos de los fenómenos eléctricos, magnéticos, luminosos, sonoros y de radiación.

**Peso.** Fuerza que un objeto ejerce sobre una superficie de sostén (o, si está suspendido, sobre una cuerda de soporte), que con frecuencia, pero no siempre, se debe a la fuerza de gravedad.

**Ingravidez.** No tener una fuerza de sostén, como en la caída libre.

**Mareas vivas o de sicigia.** Mareas alta o baja que ocurren cuando el Sol, la Tierra y la Luna están alineados de modo que las mareas debidas al Sol y a la Luna coinciden, lo que hace que las mareas altas sean más altas que el promedio y las mareas bajas sean más bajas que el promedio.

**Mareas muertas o de cuadratura.** Mareas que ocurren cuando la Luna está a medio camino entre nueva y llena, en cualquier dirección. Las mareas debidas al Sol y a la Luna se cancelan parcialmente, lo que hace a las mareas altas más bajas que el promedio y a las mareas bajas más altas que el promedio.

**Campo gravitacional.** La influencia que un cuerpo masivo extiende dentro del espacio que lo rodea, lo que produce una fuerza sobre otro cuerpo masivo. Se mide en newtons por kilogramo (N/kg).

**Agujero negro.** Concentración de masa que resulta del colapso gravitacional, cerca del cual la gravedad es tan intensa que ni siquiera la luz puede escapar.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 9.1 La ley de gravitación universal

1. ¿Qué descubrió Newton acerca de la gravedad?
2. ¿Cuál es la síntesis newtoniana?
3. ¿En qué sentido la Luna "cae"?
4. Enuncia con palabras la ley de gravitación universal de Newton. Luego haz lo mismo con una ecuación.

### 9.2 La constante de gravitación universal, *G*

5. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza gravitacional entre dos cuerpos de 1 kg que están separados 1 m?
6. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza gravitacional de la Tierra sobre un cuerpo de 1 kg en la superficie de la Tierra?
7. Cuando Henry Cavendish midió por primera vez *G*, los periódicos de la época elogiaron su experimento como "el experimento que pesó la Tierra". ¿Por qué?

### 9.3 Gravedad y distancia: la ley del inverso al cuadrado

8. ¿Cómo cambia la fuerza de gravedad entre dos cuerpos cuando la distancia entre ellos se duplica?
9. ¿Cómo cambia el grosor de la pintura rociada sobre una superficie cuando el rociador se aleja al doble de la distancia?
10. ¿Dónde pesas más: en el fondo del Valle de la Muerte o en lo alto de uno de los picos de la Sierra Nevada? ¿Por qué?

### 9.4 Peso e ingravidez

11. ¿Los resortes que están en el interior de una báscula se comprimirían más o menos si te pesaras en un elevador que acelera hacia arriba? ¿Hacia abajo?
12. ¿Los resortes que están en el interior de una báscula se comprimirían más o menos si te pesaras en un elevador que se mueve hacia arriba con *velocidad constante*? ¿Hacia abajo con *velocidad constante*?
13. ¿Cuándo tu peso es igual a *mg*?
14. Proporciona un ejemplo de cuándo tu peso es mayor que *mg*. Proporciona un ejemplo de cuándo tu peso es cero.
15. ¿Por qué los ocupantes de la Estación Espacial Internacional están ingrávidos cuando están firmemente asidos en la gravedad de la Tierra?

### 9.5 Mareas oceánicas

16. ¿Las mareas dependen más de la intensidad del tirón gravitacional o de la *diferencia* de intensidades? Explica.
17. ¿Por qué tanto el Sol como la Luna ejercen una mayor fuerza gravitacional sobre un lado de la Tierra que sobre el otro?
18. ¿Cuál tiene las mareas más altas: las *mareas vivas* o las *mareas muertas*?
19. ¿Las mareas ocurren en el interior fundido de la Tierra por la misma razón que las mareas ocurren en los océanos?
20. ¿Por qué todas las mareas son más grandes en la época de una Luna llena o una Luna nueva?
21. ¿Sobre la Luna ocurriría un momento de torsión si el satélite fuese esférico, con su centro de masa y su centro de gravedad en la misma ubicación?

### 9.6 Campos gravitacionales

22. ¿Qué es un campo gravitacional y cómo puede medirse su intensidad?
23. ¿Cuál es la magnitud del campo gravitacional en el centro de la Tierra?
24. En el caso de un planeta con densidad uniforme, ¿cuál sería la diferencia entre la magnitud del campo gravitacional a mitad del camino hacia el centro y el campo en la superficie?
25. ¿Cuál sería la magnitud del campo gravitacional en cualquier parte del interior de un planeta esférico hueco?
26. Newton consideraba que la curvatura de la trayectoria de un planeta era causada por una fuerza que actuaba sobre el planeta. ¿Qué pensaba Einstein sobre la trayectoria curva de un planeta?

### 9.7 Agujeros negros

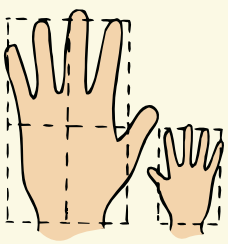
27. Si la Tierra se encogiera pero no hubiera cambio en su masa, ¿qué ocurriría con tu peso en la superficie?
28. ¿Qué ocurre con la intensidad del campo gravitacional en la superficie de una estrella que se encoge?
29. ¿Por qué un agujero negro es invisible?

### 9.8 Gravitación universal

30. ¿Cuál fue la causa de las perturbaciones descubiertas en la órbita del planeta Urano? ¿A qué descubrimiento más grande condujo esto?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

31. Estira las manos enfrente de ti, una al doble de distancia de tus ojos que la otra y calcula cuál mano parece más grande. La mayoría de las personas las ven más o menos del mismo tamaño, aunque muchos ven la mano más cercana un poco más grande. Casi nadie, con una mirada a la ligera, ve la mano más cercana cuatro veces más grande pero, por la ley del inverso al cuadrado, la mano más cercana debe parecer el doble de alta y el doble de ancha y, por tanto, parece ocupar cuatro veces más de tu campo visual que la mano más lejana. Tu convicción de que tus manos son del mismo tamaño es tan fuerte que probablemente deseches esta información. Ahora, si encimas un poco las manos y las ves con un ojo cerrado, verás que la mano más cercana es claramente más grande. Esto plantea una pregunta interesante (que Frank Oppenheimer hizo al autor hace algunos años cuando por primera vez impartió clase en el Exploratorium): "¿qué otras ilusiones tienes que no se comprueban tan fácilmente?"



32. Repite el experimento de ojear, sólo que esta vez usa dos billetes: uno sin doblar y el otro doblado a la mitad por lo largo y luego de nuevo por lo ancho, de modo que tenga 1/4 de su área. Ahora sostén los dos frente a tus ojos. ¿Dónde sostienes el billete doblado de modo que parezca del mismo tamaño que el no doblado? ¿Simpático?

## SUSTITUYE Y LISTO (FAMILIARIZACIÓN CON ECUACIONES)

$$F = G\frac{m_1 m_2}{d^2}$$

33. Calcula la fuerza de gravedad de la Tierra sobre una masa de 1 kg en la superficie de la Tierra. La masa de la Tierra es $6.0 \times 10^{24}$ kg y su radio es $6.4 \times 10^{6}$ m. ¿El resultado te sorprende?
34. Calcula la fuerza de gravedad sobre la misma masa de 1 kg si estuviera a $6.4 \times 10^{6}$ sobre la superficie de la Tierra (esto es: si estuviera a dos radios terrestres del centro de la Tierra).
35. Calcula la fuerza de gravedad que la Tierra (masa = $6.0 \times 10^{24}$ kg) y la Luna (masa = $7.4 \times 10^{22}$ kg) ejercen una sobre la otra. La distancia promedio Tierra-Luna es $3.8 \times 10^{8}$ m.
36. Calcula la fuerza de gravedad que la Tierra y el Sol ejercen mutuamente (la masa del Sol es $2.0 \times 10^{30}$ kg; la distancia promedio Tierra-Sol es $1.5 \times 10^{11}$ m).
37. Calcula la fuerza de gravedad que un bebé recién nacido (masa = 3.0 kg) y el planeta Marte (masa = $6.4 \times 10^{23}$ kg) ejercen mutuamente cuando Marte está en su punto más cercano a la Tierra (distancia = $5.6 \times 10^{10}$ m).
38. Calcula la fuerza de gravedad que un bebé recién nacido de 3.0 kg de masa y el obstetra de 100.0 kg de masa ejercen uno sobre el otro, cuando la distancia entre ellos es 0.5 m. ¿Cuál ejerce más fuerza gravitacional sobre el bebé: Marte o el obstetra? ¿Por cuánto?

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

39. Supón que estás de pie en lo alto de una escalera tan alta que te encuentras tres veces más lejos del centro de la Tierra de lo que estás en la actualidad. Demuestra que tu peso sería 1/9 de su valor actual.
40. Demuestra que la fuerza gravitacional entre dos planetas se cuadruplica si las masas de ambos planetas se duplican pero la distancia entre ellos permanece igual.
41. Demuestra que no hay cambio en la fuerza de gravedad entre dos objetos cuando sus masas se duplican y la distancia entre ellos se duplica.
42. Encuentra el cambio en la fuerza de gravedad entre dos planetas cuando la distancia entre ellos se vuelve 10 veces menor.
43. Muchas personas creen erróneamente que los astronautas que orbitan la Tierra están "por arriba de la gravedad". Calcula $g$ para el territorio del transbordador espacial, 200 km arriba de la superficie de la Tierra. La masa de la Tierra es $6.0 \times 10^{24}$ kg, y su radio es $6.38 \times 10^{6}$ m (6,380 km). ¿Qué porcentaje de 9.8 m/s$^2$ es tu respuesta?
44. La ley de gravitación universal de Newton dice que

$$F = G\frac{m_1 m_2}{d^2}.$$

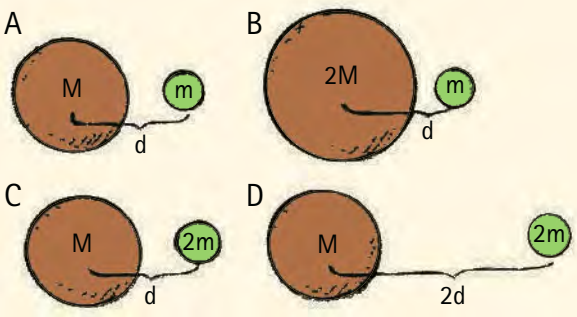
La segunda ley de Newton dice que $a = \frac{F_{neta}}{m}$

a. Con un poco de razonamiento algebraico demuestra que tu aceleración gravitacional hacia cualquier planeta de masa $M$ a una distancia $d$ de su centro es $a = \frac{GM}{d^2}$.

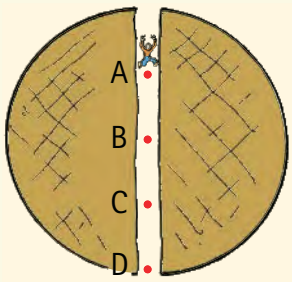
b. ¿De qué manera esta ecuación te dice si tu aceleración gravitacional depende o no de tu masa?

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

45. El planeta y su luna se atraen gravitacionalmente entre sí. Clasifica las fuerzas de atracción entre cada par, de mayor a menor.




46. Piensa en la luz de muchas llamas de velas, cada una con la misma brillantez. Clasifica la luz que entra en tu ojo, de más brillante a menos brillante, en las siguientes situaciones:
    a. Tres velas vistas a una distancia de 3 m.
    b. Dos velas vistas a una distancia de 2 m.
    c. Una vela vista a una distancia de 1 m.
47. Supón que caes en un agujero taladrado que atraviesa toda la Tierra. Desprecia la fricción y los efectos de rotación y clasifica de mayor a menor las posiciones A, B, C y D para tu:
    a. rapidez.
    b. aceleración hacia el centro de la Tierra.



48. Clasifica las fuerzas gravitacionales promedio, de mayor a menor, entre:
    a. el Sol y Marte.
    b. el Sol y la Luna.
    c. el Sol y la Tierra.

49. Clasifica las fuerzas de micromarea sobre tu propio cuerpo, de mayor a menor, producidas por:
    a. la Luna.
    b. la Tierra.
    c. el Sol.

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

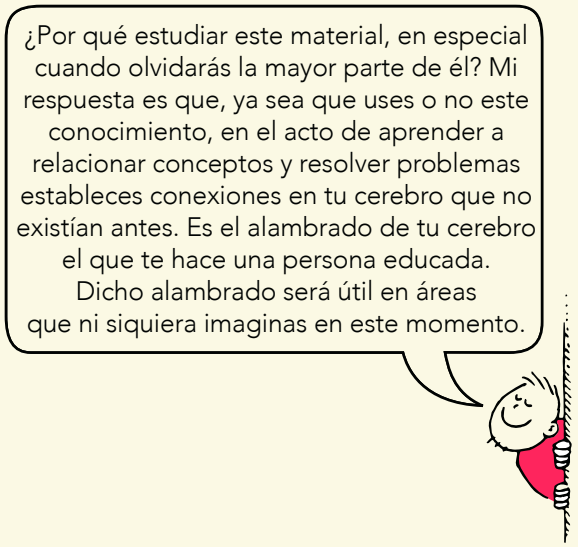
50. Comenta si la siguiente etiqueta en un producto de consumo debe o no ser causa de preocupación: *PRECAUCIÓN: la masa de este producto jala sobre toda otra masa en el Universo, con una fuerza de atracción que es proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros.*
51. La fuerza gravitacional actúa sobre todos los cuerpos en proporción a sus masas. ¿Por qué, entonces, un cuerpo pesado no cae más rápido que un cuerpo ligero?
52. ¿Cuál sería la trayectoria de la Luna si de algún modo todas las fuerzas gravitacionales sobre ella se volvieran cero?
53. ¿La fuerza de gravedad es más intensa sobre un trozo de hierro que sobre un trozo de madera con la misma masa? Defiende tu respuesta.
54. ¿La fuerza de gravedad es más intensa sobre un trozo de papel arrugado que sobre un trozo idéntico de papel que no está arrugado? Defiende tu respuesta.
55. ¿Cuál es la relación entre fuerza y distancia en una ley del inverso al cuadrado?
56. Una manzana cae debido a la atracción gravitacional hacia la Tierra. ¿Cómo se compara la atracción gravitacional de la Tierra con la de la manzana? (¿La fuerza cambia cuando intercambias $m_1$ y $m_2$ en la ecuación para gravedad: $m_2m_1$ en lugar de $m_1m_2$?)
57. Larry pesa 300 N en la superficie de la Tierra. ¿Cuál es el peso de la Tierra en el campo gravitacional de Larry?
58. ¿La aceleración debida a la gravedad en la cima del monte Everest es mayor o menor que a nivel del mar? Defiende tu respuesta.
59. Un astronauta aterriza en un planeta que tiene la misma masa que la Tierra pero el doble de diámetro. ¿Cómo difiere el peso del astronauta con el que tiene en la Tierra?
60. Un astronauta aterriza en un planeta que tiene el doble de masa que la Tierra y el doble de diámetro. ¿Cómo difiere el peso del astronauta con el que tiene en la Tierra?
61. Si de algún modo la Tierra se expandiera a un radio más grande, sin cambiar su masa, ¿cómo se afectaría tu peso? ¿Cómo se afectaría si la Tierra se encogiera? (*Sugerencia:* deja que la ecuación de fuerza gravitacional guíe tu razonamiento.)
62. ¿Por qué una persona en caída libre experimenta ingravidez, en tanto que una persona que cae con velocidad terminal no la experimenta?
63. ¿Por qué los pasajeros de los aviones a gran altitud tienen la sensación de peso en tanto que los pasajeros de un vehículo espacial en órbita, como el transbordador espacial, no la tienen?
64. ¿La fuerza gravitacional actúa sobre una persona que cae desde un risco? ¿Sobre un astronauta en el interior de un transbordador espacial en órbita?
65. Si estuvieras en un automóvil que sale del camino desde lo alto de un risco, ¿por qué momentáneamente estarías ingrávido? ¿La gravedad todavía actuaría sobre ti?
66. ¿Cuáles dos fuerzas actúan sobre ti cuando estás en un elevador en movimiento? ¿Cuándo estas dos fuerzas son de igual magnitud y cuándo no lo son?
67. Si estuvieras en un elevador en caída libre y soltaras un lápiz, éste flotaría enfrente de ti. ¿Existe una fuerza de gravedad que actúe sobre el lápiz? Defiende tu respuesta.
68. ¿Por qué un saltador de bungee siente ingravidez durante el salto?
69. Tu amigo dice que la principal razón por la que los astronautas en órbita sienten ingravidez es porque están más allá del tirón principal de la gravedad de la Tierra. ¿Por qué estás de acuerdo o en desacuerdo?
70. Un astronauta en la Estación Espacial Internacional no puede ponerse de pie sobre una báscula para pesarse. Pero un astronauta que está dentro de una estación espacial giratoria (que todavía no se construye) *puede* pararse sobre una báscula. Explica.
71. La fuerza debida a la gravedad sobre ti es *mg*. ¿Bajo qué condiciones tu peso también es *mg*?
72. Párate sobre una báscula sobre suelo a nivel y la lectura sobre la báscula muestra la fuerza gravitacional sobre ti, *mg*. Si el suelo se inclina en un ángulo, la lectura de la báscula será menor que *mg*. Discute por qué esto es así y por qué es buena idea medir tu peso cuando la báscula está sobre una superficie horizontal.
73. Supón que saltas arriba y abajo mientras te pesas sobre una báscula. La lectura del peso igualmente "salta arriba y abajo". ¿Esto significa que la fuerza de gravedad, *mg*, varía cuando saltas?
74. Si alguien jalara fuerte la manga de tu camisa, probablemente la rasgaría. Pero si todas las partes de tu camisa fueran jaladas por igual, no se rasgaría. ¿Cómo se relaciona esto con las fuerzas de las mareas?
75. La mayoría de las personas de hoy saben que las mareas oceánicas son provocadas principalmente por la influencia gravitacional de la Luna, y en consecuencia la mayoría de las personas cree que el tirón gravitacional de la Luna sobre la Tierra es mayor que el tirón gravitacional del Sol sobre la Tierra. ¿Tú qué crees?
76. ¿Existe un momento de torsión en torno al centro de masa de la Luna cuando el eje largo de la Luna se alinea con el campo gravitacional de la Tierra? Explica cómo se compara esto con una brújula magnética.
77. ¿Las mareas oceánicas existirían si el tirón gravitacional de la Luna (y del Sol) de algún modo fueran iguales en todas las partes del mundo? Explica.

78. ¿Por qué las mareas oceánicas altas no están separadas exactamente 12 horas?
79. Con respecto a las mareas oceánicas vivas y muertas, ¿cuándo son más bajas las mareas? Esto es: ¿cuál marea es mejor para buscar almejas?
80. Siempre que la marea oceánica es inusualmente alta, ¿la siguiente marea baja será inusualmente baja? Defiende tu respuesta en términos de "conservación de agua". (Si derramas agua en una tina de modo que tenga más profundidad en un extremo, ¿el otro extremo tendrá superficialidad adicional?)
81. El mar Mediterráneo tiene muy poco sedimento revuelto y suspendido en sus aguas, principalmente porque no hay ninguna marea oceánica importante. ¿Por qué crees que el mar Mediterráneo prácticamente no tiene mareas? De igual modo, ¿existen mareas en el mar Negro? ¿En el gran Lago Salado? ¿En el depósito de tu municipio? ¿En un vaso con agua? Explica.
82. El cuerpo humano está compuesto principalmente de agua. ¿Por qué la Luna en lo alto provoca un efecto de marea considerablemente menor en el compartimiento de líquidos de tu cuerpo que un melón de 1 kg sostenido sobre tu cabeza?
83. El valor de $g$ en la superficie de la Tierra es aproximadamente 10 m/s$^2$. ¿Cuál es el valor de $g$ a una distancia al doble del radio de la Tierra?
84. Si la Tierra tuviera densidad uniforme (misma masa/volumen en todas partes), ¿cuál sería el valor de $g$ dentro de la Tierra a la mitad de su radio?
85. Si la Tierra tuviera densidad uniforme, ¿tu peso aumentaría o disminuiría en el fondo de un tiro de mina profundo? Defiende tu respuesta.
86. Suele suceder que un *aumento* real de peso se encuentra incluso en los tiros de mina más profundos. ¿Qué te dice esto acerca de cómo cambia la densidad de la Tierra con la profundidad?
87. Elabora dos preguntas de opción múltiple: una que compruebe que un compañero de clase comprendió la ley del inverso al cuadrado y otra que compruebe la diferencia entre peso e ingravidez.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

88. Un amigo dice que arriba de la atmósfera, en territorio del transbordador espacial, el campo gravitacional de la Tierra es cero. Discute la mala interpretación de tu amigo usando la ecuación de la fuerza gravitacional en tu explicación.
89. Un amigo afirma que, dado que la gravedad de la Tierra es mucho más intensa que la gravedad de la Luna, las rocas sobre la Luna podrían caer a la Tierra. Discute lo equivocado de esta suposición.
90. Otro amigo señala que la gravedad de la Luna impediría que las rocas cayeran de la Luna a la Tierra, pero que si la gravedad de la Luna de algún modo ya no tirara sobre sus propias rocas, entonces las rocas sobre la Luna caerían a la Tierra. Discute lo equivocado de esta suposición.
91. En alguna parte entre la Tierra y la Luna, la gravedad de estos dos cuerpos sobre una cápsula espacial se cancelaría. ¿Esta posición está más cerca de la Tierra o de la Luna?
92. La Tierra y la Luna se atraen mutuamente por la fuerza gravitacional. ¿La Tierra más masiva atrae a la Luna menos masiva con una fuerza que es mayor, menor o igual que la fuerza con la que la Luna atrae a la Tierra? (Con una banda elástica estirada entre el pulgar y el índice, ¿cuál es jalado con más fuerza por la banda: tu pulgar o tu índice?)
93. Si la Luna jala a la Tierra tan fuertemente como la Tierra jala a la Luna, ¿por qué la Tierra no gira alrededor de la Luna, o por qué ambas no giran en torno a un punto a la mitad entre ellas?
94. La intensidad de la luz proveniente de una fuente central varía inversamente como el cuadrado de la distancia. Si vivieras en un planeta que estuviera sólo la mitad de alejado del Sol que la Tierra, ¿cómo se compararía la intensidad de la luz del Sol con la que hay sobre la Tierra? ¿Y en un planeta 10 veces más alejado que la Tierra?
95. Una pequeña fuente luminosa ubicada a 1 m enfrente de una abertura de 1 m$^2$ ilumina una pared detrás de ésta. Si la pared está 1 m detrás de la abertura (2 m desde la fuente luminosa), el área iluminada cubre 4 m$^2$. ¿Cuántos metros cuadrados se iluminarán si la pared está a 3 m de la fuente de luz? ¿A 5 m? ¿A 10 m?
96. El planeta Júpiter es más de 300 veces más masivo que la Tierra, de modo que puede parecer que un cuerpo sobre la superficie de Júpiter pesaría 300 veces más que sobre la Tierra. Pero sucede que un cuerpo escasamente pesa tres veces más sobre la superficie de Júpiter de lo que pesaría sobre la superficie de la Tierra. Discute por qué esto es así, y usa los términos de la ecuación de la fuerza gravitacional para guiar tu razonamiento.
97. Dado que tu peso cuando estás parado sobre la Tierra es igual a la atracción gravitacional entre tú y la Tierra, discute si tu peso sería o no mayor si la Tierra ganara masa. Y si el Sol ganara masa.
98. Discute y explica por qué este razonamiento es incorrecto: "El Sol atrae a todos los cuerpos sobre la Tierra. A medianoche, cuando el Sol está directamente abajo, jala sobre ti en la misma dirección que la Tierra jala sobre ti; a mediodía, cuando el Sol está directamente arriba, jala sobre ti en una dirección opuesta al tirón de la Tierra sobre ti. Por tanto, de algún modo debes pesar un poco más a medianoche y un poco menos a mediodía".
99. ¿Cuándo será mayor la fuerza gravitacional entre tú y el Sol: hoy a mediodía, o mañana a medianoche? Discute y defiende tu respuesta.
100. Si la masa de la Tierra aumentara, tu peso aumentaría en correspondencia. Pero, si la masa del Sol aumentara, tu peso no cambiaría en absoluto. Discute por qué esto es así.
101. ¿El hecho de que un lado de la Luna siempre da la cara a la Tierra significa que la Luna gira en torno a su eje (como una peonza) o que no gira en torno a su eje? Discute y defiende tu respuesta.
102. ¿Cuál sería el efecto sobre las mareas terrestres si el diámetro de la Tierra fuera mucho mayor de lo que es? ¿Si la Tierra tuviera su tamaño actual pero la Luna fuera mucho más grande y tuviera la misma masa?

103. ¿Cuál produciría las micromareas más grandes en tu cuerpo: la Tierra, la Luna o el Sol? Discute y defiende tu respuesta.
104. Discute por qué las mareas ocurren en la corteza terrestre y en la atmósfera de la Tierra.
105. Discute cuál necesita más combustible: un cohete que va de la Tierra a la Luna o un cohete que regresa de la Luna a la Tierra.
106. Si de algún modo pudieras hacer un túnel dentro de una estrella con densidad uniforme, ¿tu peso aumentaría o disminuiría? Si, en vez de ello, de algún modo pudieras pararte en la superficie de una estrella que se encoge, ¿tu peso aumentaría o disminuiría? Discute por qué difieren tus respuestas.
107. Si el Sol se encogiera para convertirse en un agujero negro, discute y demuestra, a partir de la ecuación de fuerza gravitacional, que la órbita de la Tierra no resultaría afectada.
108. Si la Tierra fuera hueca pero todavía tuviera la misma masa y el mismo radio, ¿tu peso en tu ubicación actual sería mayor, menor o igual que el de ahora? Discute y explica.
109. Un nuevo compañero de discusión dice que la Estación Espacial Internacional está fuera del tirón de gravedad de la Tierra, como lo demuestran sus habitantes en una condición de ingravidez. Corrige esta mala interpretación.
110. Algunas personas desestiman la validez de las teorías científicas al decir que "sólo son teorías". La ley de gravitación universal es una teoría. ¿Esto significa que los científicos todavía dudan de su validez? Discute y explica.



10

CAPÍTULO 10

# Movimiento de proyectiles y satélites


10.1 Movimiento de proyectiles

10.2 Proyectiles con movimiento rápido: satélites

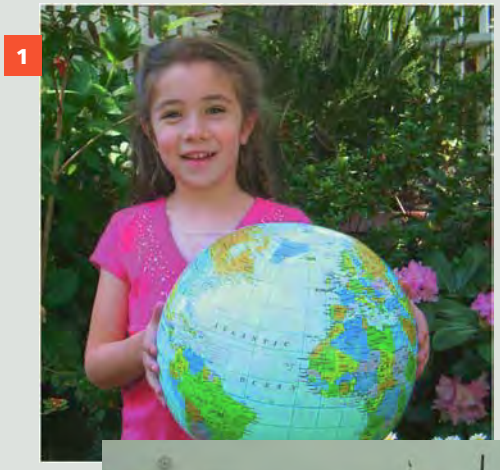
10.3 Órbitas satelitales circulares

10.4 Órbitas elípticas

10.5 Leyes de movimiento planetario de Kepler

10.6 Conservación de energía y movimiento de satélites

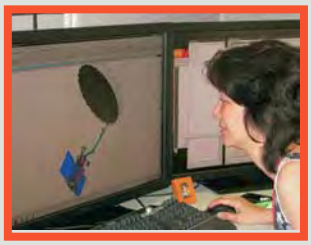
10.7 Rapidez de escape

**1** La atmósfera de la Tierra es una pequeña fracción del ancho de los dedos de Emily Abrams, ¡y la Estación Espacial Internacional orbita aproximadamente a la distancia de su uña más pequeña! **2** Ben Thoma y Tenny Lim en la "habitación limpia" sin polvo del Jet Propulsion Laboratory con el módulo de descenso que colocó al *Curiosity* sobre la superficie marciana el 6 de agosto de 2012. **3** Tenny está de pie junto a modelos de los exploradores marcianos que muestran el gran tamaño del *Curiosity*. **4** Shruti Kumar pide a sus estudiantes predecir dónde aterrizará el proyectil en función de una rapidez y ángulo de lanzamiento determinados.

La influencia de un profesor no conoce fronteras. Su influencia sobre los estudiantes trasciende la opinión que recibe de ellos. Cuando me preguntan de cuál de mis muchos alumnos me siento más orgulloso y a quién he influido más, mi respuesta es rápida: Tenny Lim. Además de ser brillante, es una artista y muy diestra con sus manos. Fue la estudiante con mejor calificación de mi clase de Física Conceptual en 1980 y obtuvo un grado de técnico auxiliar de ciencias en Tecnología de Laboratorio Dental. Con mi motivación y apoyo, continuó en el City College con cursos de matemática y ciencia y decidió hacer la carrera de ingeniería. Dos años después se cambió a la California Polytechnic State University en San Luis Obispo. Mientras concluía su licenciatura en ingeniería mecánica, un reclutador del Jet Propulsion Laboratory (JPL) en Pasadena quedó impresionado de que ella también tomara clases de arte para equilibrar sus estudios técnicos. Cuando le preguntó acerca de esto, Tenny respondió que el arte era una de sus pasiones. Lo que el reclutador buscaba era alguien talentoso tanto en arte como en ingeniería para el equipo de diseño del JPL. Tenny fue contratada en el programa espacial y trabajó en muchas misiones espaciales, y en fecha más reciente fue la diseñadora principal para la etapa de descenso que llevó al *Curiosity* a la superficie de Marte en 2012.

El proyecto actual de Tenny es la misión *Soil Moisture Active Pasive* (SMAP, humedad de suelo activa pasiva), que diseña y construye un satélite para medir y distinguir entre la humedad del suelo congelado sobre superficies de la Tierra y superficies descongeladas. Las señales hacia y desde la Tierra por medio de una antena de malla desplegable de seis metros (véase fotografía) ofrecen estimaciones mejoradas de las transferencias de agua, energía y carbono entre la Tierra y la atmósfera. Tenny es la diseñadora mecánica principal en la parte de la instrumentación del satélite. También continúa con su arte, mucho del cual se exhibe en galerías locales.



La historia de Tenny ilustra el consejo que le doy a los jóvenes: destaquen en más de una cosa.

## 10.1 Movimiento de proyectiles

Sin gravedad, podrías lanzar una roca en un ángulo hacia el cielo y seguiría una trayectoria en línea recta. Sin embargo, debido a la gravedad, la trayectoria se curva. Una roca lanzada, una pelota de tenis o cualquier objeto que se proyecte por algún medio y siga en movimiento por su propia inercia se llama **proyectil**. Para los artilleros de siglos anteriores, las trayectorias curvas de los proyectiles parecían muy complejas. En la actualidad, dichas trayectorias son sorprendentemente simples cuando se observan por separado las componentes horizontal y vertical de la velocidad.

La componente horizontal de la velocidad para un proyectil no es más complicada que la velocidad horizontal de una bola de boliche que rueda libremente sobre la bolera. Si el efecto retardador de la fricción puede ignorarse, no hay fuerza horizontal sobre la bola y su velocidad es constante. Rueda con su propia inercia y recorre distancias iguales en intervalos de tiempo iguales (Figura 10.1, izquierda). La componente horizontal del movimiento de un proyectil es exactamente igual al movimiento de la bola de boliche sobre la bolera.

La componente vertical del movimiento para un proyectil que sigue una trayectoria curva es exactamente igual al movimiento descrito en el Capítulo 3 para un objeto en caída libre. La componente vertical es exactamente la misma que para un objeto que cae libremente en línea recta hacia abajo, como se muestra a la derecha en la Figura 10.1. Cuanto más rápido caiga el objeto, mayor será la distancia recorrida en cada segundo sucesivo. O, si el objeto se proyecta hacia arriba, las distancias verticales de viaje disminuyen con el tiempo en su camino de ascenso.

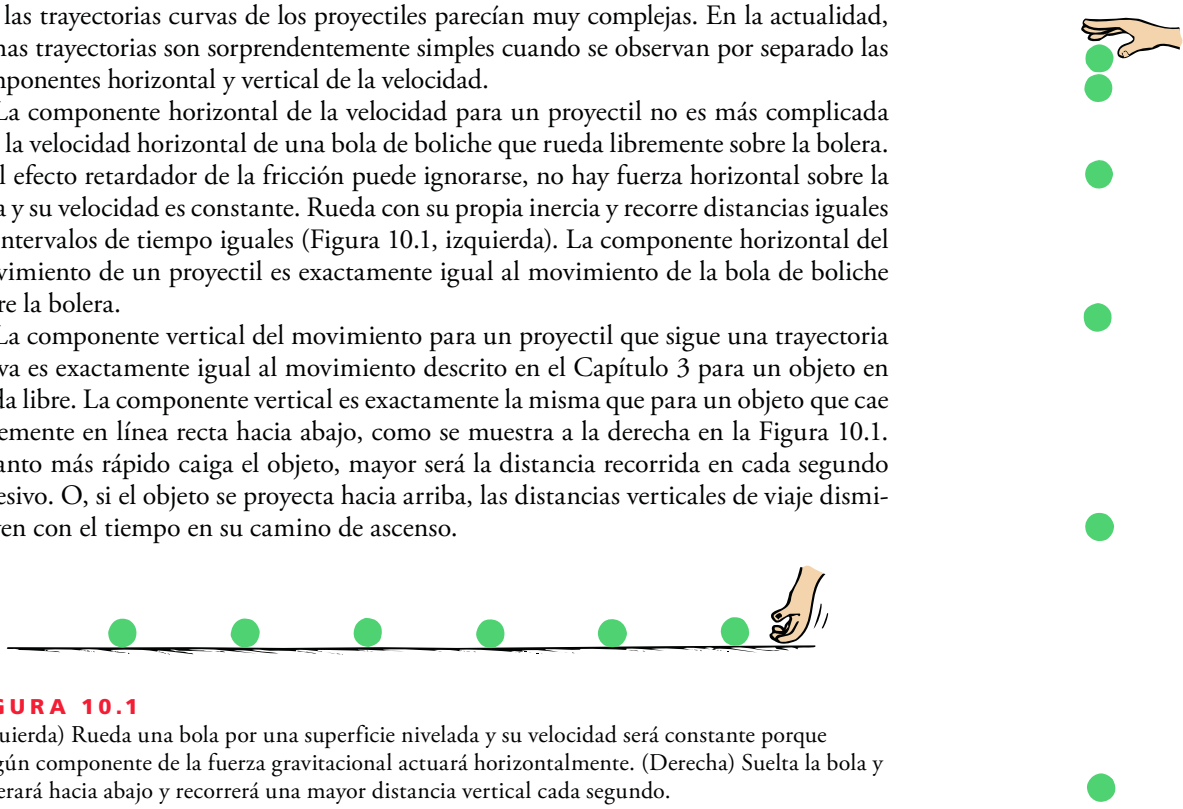


**FIGURA 10.1**
(Izquierda) Rueda una bola por una superficie nivelada y su velocidad será constante porque ningún componente de la fuerza gravitacional actuará horizontalmente. (Derecha) Suelta la bola y acelerará hacia abajo y recorrerá una mayor distancia vertical cada segundo.

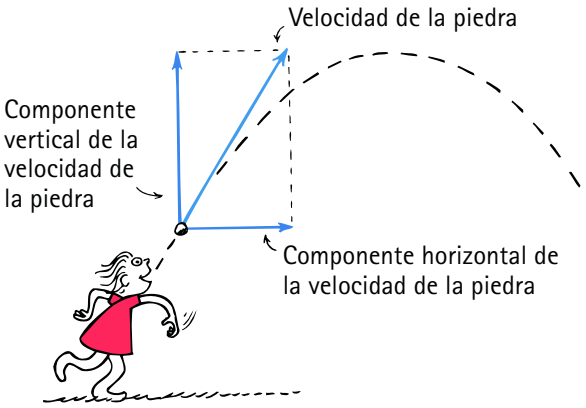



**FIGURA 10.2**
Componentes vertical y horizontal de la velocidad de una piedra.

**VIDEO: Movimiento de proyectiles**

**VIDEO: Más movimiento de proyectiles**

**SCREENCAST: Caídas laterales**

**SCREENCAST: Lanzamiento de bola**

En la Figura 10.2 (idéntica a la Figura 5.27) se ven los vectores que componen la velocidad de una piedra. La componente horizontal de la velocidad es completamente independiente de la componente vertical de la velocidad cuando la resistencia del aire es suficientemente pequeña como para ignorarse. La componente horizontal constante de la velocidad no es afectada por la fuerza vertical de la gravedad. Es importante resaltar que cada componente es independiente del otro. Sus efectos combinados producen las trayectorias de los proyectiles.

## Proyectiles lanzados horizontalmente

El movimiento de proyectiles se analiza muy bien en la Figura 10.3, que muestra una exposición estroboscópica simulada de una bola que rueda por el borde de una mesa. Examínala con mucho cuidado porque hay mucha física muy buena ahí. A la izquierda se observan posiciones secuenciales igualmente cronometradas de la componente horizontal del movimiento de la bola sin el efecto de la gravedad. A continuación se ve el movimiento vertical sin una componente horizontal. Para analizar mejor la trayectoria curva de la tercera figura, hay que considerar por separado las componentes horizontal y vertical del movimiento. Observa dos cosas importantes: la primera es que la componente horizontal de velocidad de la bola no cambia a medida que la bola que cae avanza hacia adelante. La bola recorre la misma distancia horizontal en iguales tiempos entre los destellos. Eso se debe a que no hay componente de fuerza gravitacional que actúe horizontalmente. La gravedad actúa sólo *hacia abajo*, de modo que la única aceleración de la bola es *hacia abajo*. La segunda cosa que hay que observar es que las posiciones verticales se alejan cada vez más con el tiempo. Las distancias verticales recorridas son las mismas, como las que ocurren si la bola simplemente cayera. Observa que la curvatura de la trayectoria de la bola es la combinación de movimiento horizontal constante y movimiento vertical acelerado.

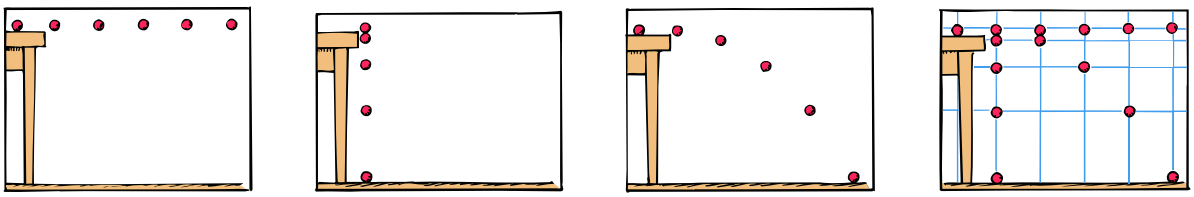



**FIGURA 10.3**
Fotografías simuladas de una bola en movimiento iluminada con una luz estroboscópica.

La trayectoria de un proyectil que acelera sólo en la dirección vertical mientras se mueve con una velocidad horizontal constante es una **parábola**. Cuando la resistencia del aire es suficientemente pequeña como para ignorarse, como sucede con un objeto pesado sin gran rapidez, la trayectoria del objeto es parabólica.

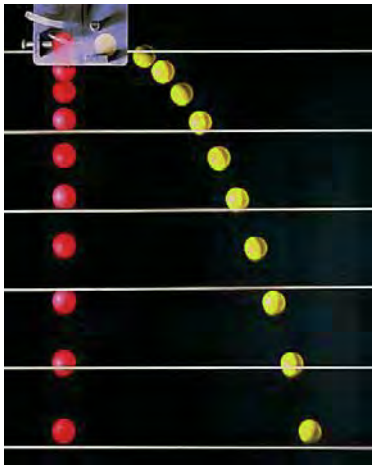
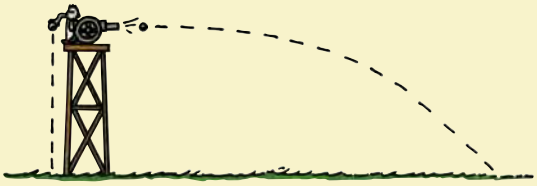


**FIGURA 10.4**
Fotografía estroboscópica de dos bolas de golf soltadas al mismo tiempo desde un mecanismo que permite a una bola caer libremente mientras la otra se proyecta de manera horizontal.

**PUNTO DE CONTROL**

**En el instante cuando un cañón dispara horizontalmente una bala sobre un prado aplanado, otra bola de cañón que se mantiene al lado del cañón se libera y cae hacia el suelo. ¿Cuál bola golpea primero el suelo: la que se disparó horizontalmente o la que se soltó desde el reposo?**



**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Ambas bolas de cañón golpean el suelo al mismo tiempo, pues ambas caen *la misma distancia vertical*. Observa que la física es la misma que se muestra en las Figuras 10.3 y 10.4. Esto se puede razonar de otra forma si preguntas cuál golpearía primero el suelo si el cañón se apuntara en un ángulo *hacia arriba*. Entonces la bala soltada golpearía primero, en tanto que la bala disparada seguiría en el aire. Ahora considera que el cañón apunta *hacia abajo*. En este caso, la bola disparada golpearía primero. De modo que, proyectada hacia arriba, la que se suelta golpea primero; hacia abajo, la disparada golpea primero. ¿Existe algún ángulo en el que haya empate, donde ambas golpeen al mismo tiempo? ¿Puedes ver que esto ocurre cuando el cañón está horizontal?

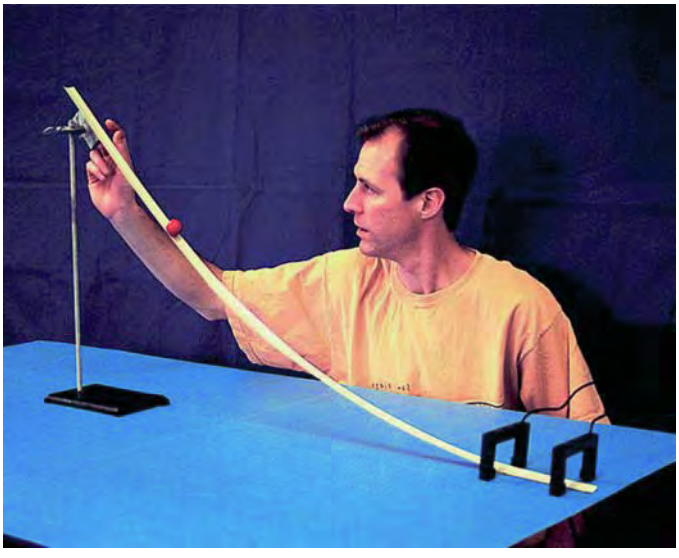


**FIGURA 10.5**
Chuck Stone suelta una bola cerca de lo alto de una pista. Sus estudiantes realizan mediciones para predecir dónde debe colocarse una lata en el suelo para que atrape la bola después de que ruede y salga de la mesa.

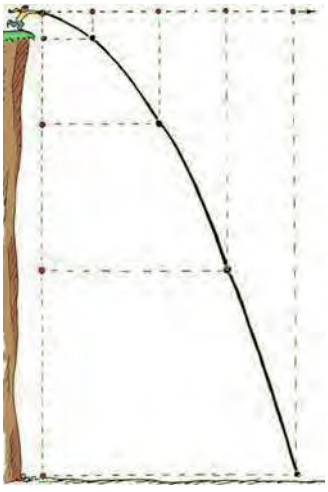


**FIGURA 10.6**
La línea punteada vertical es la trayectoria de una piedra soltada desde el reposo. La línea punteada horizontal sería su trayectoria si no hubiera gravedad. La línea curva muestra la trayectoria que combina los movimientos horizontal y vertical.

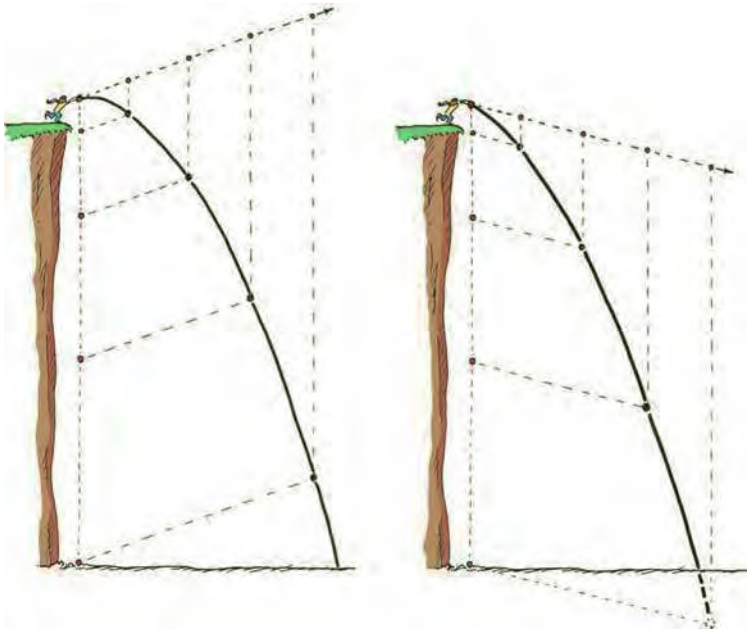


**FIGURA 10.7**
Ya sea que se lance con un ángulo ascendente o descendente, la distancia vertical de caída debajo de la trayectoria idealizada en línea recta es la misma para tiempos iguales.

## Proyectiles lanzados en un ángulo

**SCREENCAST: El problema de la pelota de tenis**

En la Figura 10.7 se ven las trayectorias de piedras lanzadas con un ángulo hacia arriba (izquierda) y hacia abajo (derecha). Las líneas rectas punteadas muestran las trayectorias ideales de las piedras si no hubiera gravedad. Observa que la distancia vertical abajo de las trayectorias idealizadas en línea recta es la misma para tiempos iguales. Esta distancia vertical es independiente de lo que ocurre horizontalmente.

La Figura 10.8 muestra distancias verticales específicas para una bala de cañón disparada con un ángulo hacia arriba. Si no hubiera gravedad, la bala de cañón seguiría la trayectoria en línea recta que se muestra con la línea punteada. Pero hay gravedad, de modo que esto no ocurre. Lo que realmente sucede es que la bala de cañón cae continuamente debajo de la línea imaginaria hasta que finalmente golpea el suelo. Observa que la distancia vertical que cae debajo de cualquier punto sobre la línea punteada es la misma distancia vertical que caería si se soltara desde el reposo y hubiera caído durante la misma cantidad de tiempo. Esta distancia, como se propuso en el Capítulo 3, está dada por $d = \frac{1}{2}gt^2$, donde $t$ es el tiempo transcurrido.

Para decirlo de otra manera: imagina que lanzas un proyectil hacia el cielo con cierto ángulo y que no hay gravedad. Después de muchos segundos $t$, el proyectil debe estar en

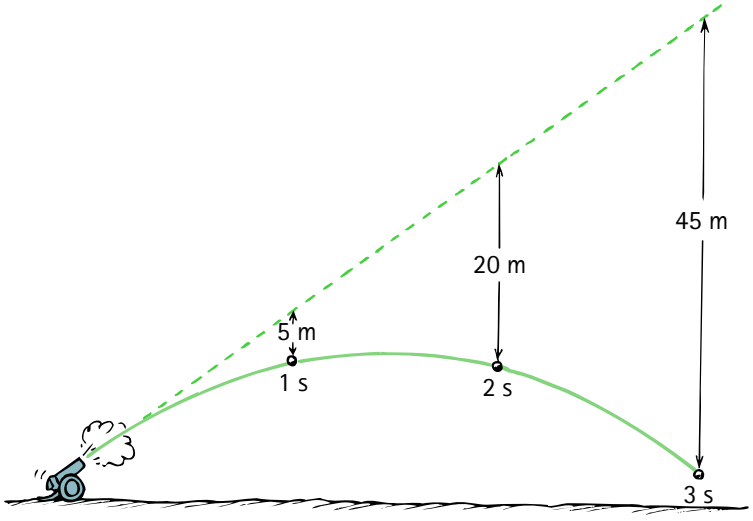
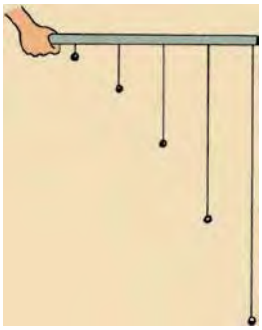



**FIGURA 10.8**
Sin gravedad, el proyectil seguiría una trayectoria en línea recta (línea punteada). Pero, debido a la gravedad, el proyectil cae debajo de esta línea la misma distancia vertical que caería si se soltara desde el reposo. Compara las distancias que cae con las dadas en la Tabla 3.3 del Capítulo 3. (Con $g = 9.8$ m/s$^2$, tales distancias son más precisamente 4.9 m, 19.6 m y 44.1 m.)

## PRACTICANDO LA FÍSICA: CUENTAS COLGANTES PRÁCTICAS



Elabora tu propio modelo de trayectorias de proyectiles. Divide una regla o una vara en cinco espacios iguales. En la posición 1, cuelga una cuenta de una cuerda que mida 1 cm de largo, como se muestra. En la posición 2, cuelga una cuenta de una cuerda que mida 4 cm de largo. En la posición 3, haz lo mismo con una cuerda de 9 cm de largo. En la posición 4, usa 16 cm de cuerda, y para la posición 5, usa 25 cm de cuerda. Si sostienes la vara horizontalmente, tendrás una versión de la Figura 10.6. Sostenla en un ligero ángulo hacia arriba para mostrar una versión de la Figura 10.7, izquierda. Y en un ángulo hacia abajo para mostrar una versión de la Figura 10.7, derecha.

cierto punto a lo largo de una trayectoria en línea recta. Pero, debido a la gravedad, no lo está. ¿Dónde está? La respuesta es que está directamente debajo de este punto. ¿Qué tan abajo? La respuesta en metros es $5t^2$ (o, más precisamente, $4.9t^2$). ¡Qué tal!

Observa otra cosa en la Figura 10.8 y las figuras anteriores. La bola se mueve iguales distancias horizontales en iguales intervalos de tiempo. Esto es porque no ocurre ninguna aceleración en sentido horizontal. La única aceleración es vertical, en la dirección de la gravedad de la Tierra.

Peter Rea, de Arbor Scientific, produce este lanzador de proyectiles impulsado por aire para aulas de física en exteriores.

### PUNTO DE CONTROL

1. **Supón que la bala de cañón de la Figura 10.8 se dispara más rápido. ¿A cuántos metros por debajo de la línea punteada estaría al final de 5 s?**
2. **Si la componente horizontal de la velocidad de la bala de cañón es 20 m/s, ¿a qué distancia horizontal estará la bala de cañón en 5 s?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

**1.** La distancia vertical por debajo de la línea punteada al final de 5 s es 125 m [$d = 5t^2 = 5(5)^2 = 5(25) = 125$ m]. Es muy interesante que esta distancia no dependa del ángulo del cañón. Si se desprecia la resistencia aerodinámica, cualquier proyectil caerá $5t^2$ abajo de donde habría llegado si no hubiera gravedad.

**2.** Sin resistencia aerodinámica, la bala de cañón recorrerá una distancia horizontal de 100 m [$d = \bar{v}t = (20 \text{ m/s})(5 \text{ s}) = 100$ m]. Observa que, dado que la gravedad sólo actúa verticalmente y no hay aceleración en la dirección horizontal, la bala de cañón recorre una distancia horizontal igual en tiempos iguales. Esta distancia es simplemente su componente horizontal de velocidad multiplicado por el tiempo (y no $5t^2$, que sólo se aplica al movimiento vertical bajo la aceleración de la gravedad).

En la Figura 10.9 se ven vectores que representan las componentes horizontal y vertical de velocidad de un proyectil que sigue una trayectoria parabólica. Observa que la componente horizontal en todas partes a lo largo de la trayectoria es la misma, y sólo cambia la componente vertical. La velocidad real se representa con el vector que es la diagonal del rectángulo formado por las componentes vectoriales. En la parte superior de la trayectoria, la componente vertical es cero, de modo que la velocidad en el cenit sólo es la componente horizontal de velocidad. En todas las demás partes a lo largo de la trayectoria, la magnitud de la velocidad es mayor (tal como la diagonal de un rectángulo es mayor que cualquiera de sus lados).

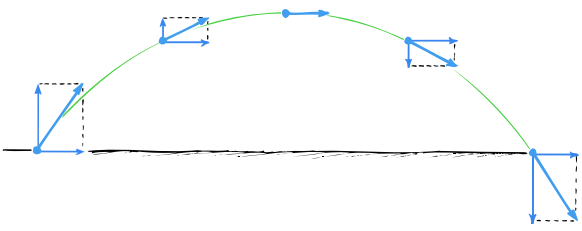


**FIGURA 10.9**
Velocidad de un proyectil en varios puntos a lo largo de su trayectoria. Observa que la componente vertical cambia y que la componente horizontal es la misma en todas partes.

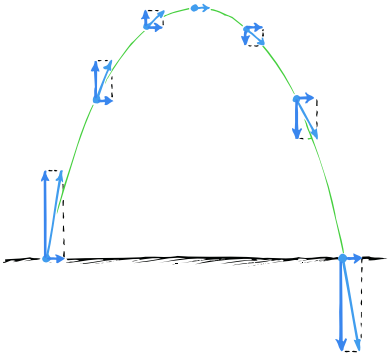


**FIGURA 10.10**
Trayectoria cuando el ángulo de proyección es más inclinado.

La Figura 10.10 muestra la trayectoria trazada por un proyectil lanzado con la misma rapidez a un ángulo más inclinado. Observa que el vector de velocidad inicial tiene una componente vertical más grande que cuando el ángulo de lanzamiento es más pequeño. Esta componente más grande resulta en una trayectoria que alcanza mayor altura. Pero la componente horizontal es menor y el alcance es menor.

La Figura 10.11 muestra las trayectorias de varios proyectiles, todos con la misma rapidez inicial pero diferentes ángulos de lanzamiento. La figura desprecia los efectos de la resistencia aerodinámica, de modo que las trayectorias son todas parábolas. Observa que dichos proyectiles alcanzan diferentes *altitudes,* o alturas, sobre el suelo. También tienen diferentes *alcances horizontales*, o distancias recorridas horizontalmente. ¡Lo que es sorprendente observar en la Figura 10.11 es que se obtiene el mismo alcance a partir de dos diferentes ángulos de lanzamiento cuando los ángulos suman 90°! Un objeto lanzado al aire con un ángulo de 60°, por ejemplo, tendría el mismo alcance que si se lanzara con la misma rapidez con un ángulo de 30°. Desde luego, para el ángulo menor, el objeto permanece en el aire durante un tiempo más corto. El alcance máximo ocurre cuando el ángulo de lanzamiento es de 45°, cuando la resistencia aerodinámica es despreciable.

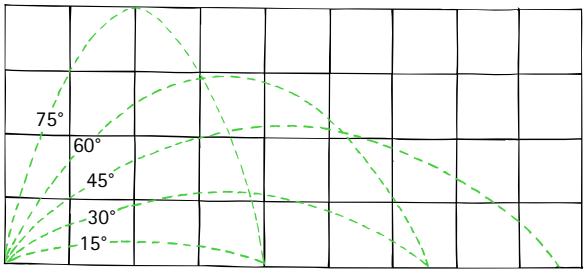



**FIGURA 10.11**
Alcances horizontales de un proyectil disparado con la misma rapidez con diferentes ángulos de proyección.

**FIGURA 10.12**
El alcance máximo se lograría cuando la pelota se bateara con un ángulo de 45°, pero sólo en ausencia de resistencia aerodinámica.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Una pelota de béisbol se batea con cierto ángulo en el aire. Una vez en el aire, y si desprecias la resistencia aerodinámica, ¿cuál es la aceleración vertical de la pelota? ¿La horizontal?**
2. **¿En qué parte de su trayectoria la pelota de béisbol tiene rapidez mínima?**
3. **Piensa en una pelota de béisbol bateada que sigue una trayectoria parabólica en un día cuando el Sol está directamente arriba. ¿Cómo se compara la rapidez de la sombra de la pelota que cruza el campo con la componente horizontal de velocidad de la pelota?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La aceleración vertical es *g* (directamente hacia abajo) porque la fuerza de gravedad es vertical. La aceleración horizontal es cero porque ninguna fuerza horizontal actúa sobre la pelota.
2. La rapidez mínima de una pelota ocurre en la parte superior de su trayectoria. Si se lanza verticalmente, su rapidez en la parte superior es cero. Si se lanza con un ángulo, la componente vertical de velocidad es cero en la parte superior, lo que sólo deja a la componente horizontal. De modo que la rapidez en la parte superior es igual a la componente horizontal de la velocidad de la pelota en cualquier punto. ¿No tiene sentido esto?
3. ¡Son iguales!

Si se ignoran los efectos de la resistencia aerodinámica, el alcance máximo para una pelota de béisbol ocurriría cuando se batea 45° arriba de la horizontal. Sin resistencia aerodinámica, la pelota sube exactamente lo que cae, y recorre la misma cantidad de terreno mientras se eleva que mientras cae. Pero no es así cuando la resistencia aerodinámica frena la pelota. Entonces su rapidez horizontal en la parte superior de su trayectoria es menor que su rapidez horizontal cuando deja el bate,

de modo que *recorre menos terreno mientras cae que cuando se eleva*. Como resultado, para un alcance máximo, la pelota debe dejar el bate con más rapidez horizontal que rapidez vertical, a cerca de 25 a 34°, considerablemente menos que 45°. Lo mismo ocurre con las bolas de golf. (Como se demostrará en el Capítulo 14, el giro de la bola también afecta el alcance.) Para proyectiles pesados, como las jabalinas y la bala, el aire tiene menos efecto sobre el alcance. Una jabalina, por ser pesada y presentar un área transversal muy pequeña al aire, sigue una parábola casi perfecta cuando se lanza. Lo mismo ocurre con una bala. Ajá, pero las *rapideces de lanzamiento* no son iguales para los proyectiles pesados lanzados con diferentes ángulos. Cuando se lanza una jabalina o una bala, una parte significativa de la *fuerza* de lanzamiento se va en levantar (combatir la gravedad), de modo que lanzar a 45° significa menos rapidez de lanzamiento. Puedes poner esto a prueba tú mismo: lanza una pesada roca horizontalmente y luego con un ángulo hacia arriba; descubrirás que el lanzamiento horizontal es mucho más rápido. De modo que el alcance máximo para los proyectiles pesados lanzados por seres humanos se logra con ángulos menores que 34°, y no por la resistencia del aire.

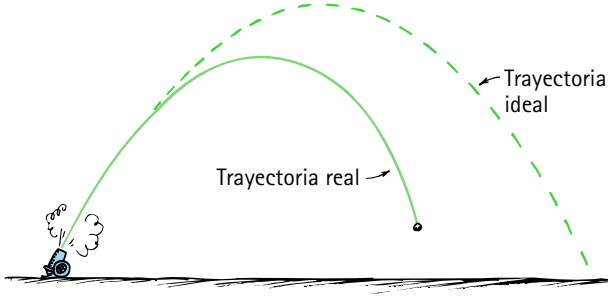



**FIGURA 10.13**
En presencia de resistencia del aire, la trayectoria de un proyectil con gran rapidez se queda corta con respecto a la trayectoria parabólica idealizada.

Cuando la resistencia del aire es suficientemente pequeña como para despreciarse, un proyectil se elevará a su altura máxima en el mismo tiempo que tarde en caer desde dicha altura hasta su nivel inicial (Figura 10.14). Esto se debe a que su desaceleración por la gravedad mientras sube es la misma que su aceleración por la gravedad mientras baja. Por tanto, la rapidez que pierde mientras sube es la misma que la rapidez que gana mientras baja. De modo que el proyectil llega a su nivel inicial con la misma rapidez que tenía cuando se proyectó inicialmente.

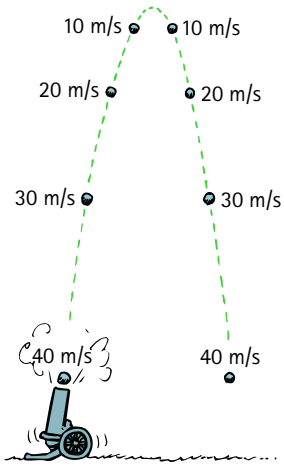



**FIGURA 10.14**
Sin resistencia aerodinámica, la rapidez perdida mientras sube es igual a la rapidez ganada mientras baja: el tiempo de subida es igual al tiempo de bajada.

Los juegos de béisbol por lo general tienen lugar en terrenos llanos. Para el movimiento de proyectiles de corto alcance sobre el campo de juego, la Tierra puede considerarse plana porque el vuelo de la pelota no se afecta con la curvatura de la Tierra. Sin embargo, en el caso de proyectiles de muy largo alcance, debe tenerse en cuenta la curvatura de la superficie de la Tierra. Ahora verás que, si un objeto se proyecta suficientemente rápido, caerá todo el tiempo alrededor de la Tierra y se convertirá en un satélite terrestre.

## PUNTO DE CONTROL

**El chico sobre la torre lanza una bola a 20 m de distancia, como se muestra en la Figura 10.15. ¿Cuál es su rapidez de lanzamiento?**

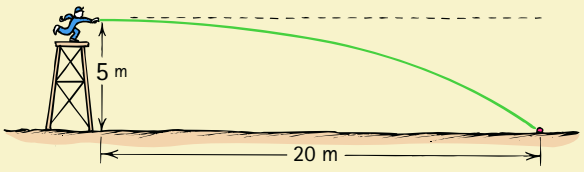



**FIGURA 10.15**

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

La bola se lanza horizontalmente, de modo que la rapidez de lanzamiento es distancia horizontal divida entre tiempo. Se proporciona una distancia horizontal de 20 m, pero no se establece el tiempo. Sin embargo, al saber que la caída vertical es de 5 m, ¡recuerdas que una caída de 5 m tarda 1 s! De acuerdo con la ecuación para rapidez constante (que se aplica al movimiento horizontal), $v = d/t$ = (20 m)/(1 s) = 20 m/s. Es interesante observar que la ecuación para rapidez constante, $v = d/t$, guía tu razonamiento acerca del factor crucial de este problema: el *tiempo.*

## NUEVA VISITA AL "TIEMPO DE VUELO"

En el Capítulo 3 se estableció que el tiempo en el aire durante un salto es independiente de la rapidez horizontal. Ahora verás por qué: las componentes horizontal y vertical del movimiento son independientes entre sí. Las reglas del movimiento de proyectiles se aplican al salto. Una vez que el pie se despega del suelo, sólo la fuerza de gravedad actúa sobre el saltador (si desprecias la resistencia del aire). El tiempo en el aire sólo depende de la componente vertical de la velocidad de despegue. Sin embargo, sucede que la acción de correr puede representar una diferencia. Si el jugador corre, la fuerza de despegue durante el salto puede aumentar en forma considerable al golpear los pies contra el suelo (y el suelo, golpear contra los pies en forma de acción-reacción), de modo que el tiempo en el aire de un salto que se da corriendo puede superar el "tiempo de vuelo" de un salto de pie. Pero, se subraya de nuevo: una vez que los pies del corredor se despegan del suelo, sólo la componente vertical de la velocidad de despegue determina el tiempo en el aire.

## 10.2 Proyectiles con movimiento rápido: satélites

La curvatura de la Tierra cae 5 m por cada 8 km de tangente, lo que significa que, si flotaras en un océano en calma, sólo podrías ver la parte superior de un mástil de 5 m en un barco a 8 km de distancia.

Considera al lanzador de béisbol sobre la torre de la Figura 10.15. Si la gravedad no actuara sobre la bola, la bola seguiría la trayectoria en línea recta que se muestra con la línea punteada. Lo mismo sucedería con la bola lanzada por la niña de la Figura 10.16. Pero la gravedad sí actúa, de modo que la bola cae por debajo de estas trayectorias en línea recta. De hecho, como se acaba de señalar, 1 s después de que la bola abandone la mano del lanzador, habrá caído una distancia vertical de 5 m debajo de la línea punteada, cualquiera que sea la rapidez de lanzamiento. Es importante entender esto, pues es el quid del movimiento de los satélites.

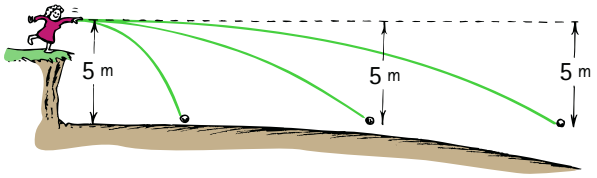



**FIGURA 10.16**
Si lanzas una bola con cualquier rapidez, 1 s después habrá caído 5 m abajo de donde habría estado sin gravedad.

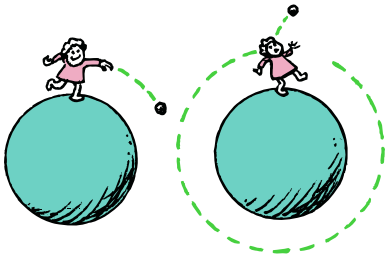


**FIGURA 10.17**
Si la rapidez de la piedra es suficientemente grande, la piedra se convierte en un satélite.

Un **satélite** terrestre es tan sólo un proyectil que cae *alrededor* de la Tierra en lugar de *hacia* ella. La rapidez del satélite debe ser suficientemente grande para garantizar que su distancia de caída coincida con la curvatura de la Tierra. Un hecho geométrico sobre la curvatura de la Tierra es que su superficie cae una distancia vertical de 5 m por cada 8,000 m de tangente respecto de la superficie (Figura 10.18). Si una pelota de béisbol pudiera lanzarse tan rápido que recorriera una distancia horizontal de 8 km durante el segundo que tarda en caer 5 m, entonces seguiría la curvatura de la Tierra. Ésta es una rapidez de 8 km/s. Si no te parece rápido, ¡conviértela a kilómetros por hora y obtendrás unos impresionantes 29,000 km/h (o 18,000 mi/h)!

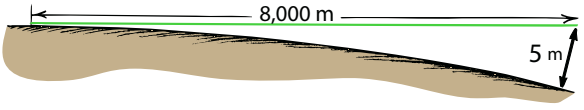



**FIGURA 10.18**
Curvatura de la Tierra, ¡no está a escala!

A esta rapidez, la fricción atmosférica quemaría la pelota de béisbol, o incluso un pedazo de hierro. Éste es el destino de los fragmentos de roca y otros meteoritos que entran en la atmósfera de la Tierra y se queman, y aparecen como "estrellas fugaces". Es por esto que los satélites se lanzan a altitudes de 150 km o más, para que estén arriba de casi toda la atmósfera y casi sin resistencia del aire. Suele tenerse la idea equivocada de que los satélites que orbitan a grandes alturas están libres de gravedad. Nada podría estar más lejos de la verdad. La fuerza de gravedad sobre un satélite que está a 200 km de la superficie de la Tierra es casi tan fuerte como lo es en la superficie. La razón para colocarlo a esa gran altitud es que el satélite esté lejos de la atmósfera de la Tierra, donde prácticamente no haya resistencia del aire, pero no para que esté fuera de la gravedad de la Tierra.

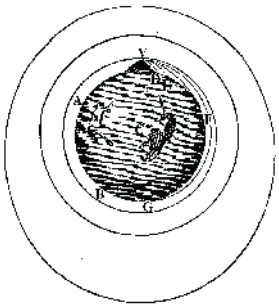


**FIGURA 10.19**
"Cuanto mayor sea la velocidad… con la que se proyecte (una piedra), más lejos llegará antes de caer a la Tierra. Por tanto, es posible suponer que la velocidad aumenta tanto que describiría un arco de 1, 2, 5, 10, 100, 1,000 millas antes de llegar a la Tierra, hasta que al final, al superar los límites de la Tierra, entraría al espacio sin tocarla."— Isaac Newton, *Sistema del mundo.*

Isaac Newton entendió el movimiento de los satélites y razonó que la Luna era simplemente un proyectil que orbitaba la Tierra bajo la atracción de la gravedad. Este concepto se ilustra en un dibujo de Newton (Figura 10.19). Comparó el movimiento de la Luna con el de una bala de cañón disparada desde el punto más alto de una gran montaña. Imaginó que la cima de la montaña estaba arriba de la atmósfera de la Tierra, de modo que la resistencia del aire no impediría el movimiento de la bala de cañón. Si se disparara con una rapidez horizontal baja, una bala de cañón seguiría una trayectoria curva y pronto golpearía la Tierra abajo. Si se disparara más rápido, su trayectoria sería menos curva y golpearía la Tierra más lejos. Si la bala de cañón se disparara suficientemente rápido, Newton razonó que la trayectoria curva se volvería un círculo y la bala de cañón daría vueltas a la Tierra indefinidamente. Estaría en órbita.

**FIGURA 10.20**
Un satélite terrestre es un proyectil en un estado de caída libre constante. Debido a su velocidad tangencial, cae alrededor de la Tierra en lugar de verticalmente hacia ella.

Tanto la bala de cañón como la Luna tienen una velocidad tangencial (paralela a la superficie de la Tierra) que es suficiente para asegurar el movimiento *alrededor* de la Tierra en lugar de *hacia* ella. Si no hay resistencia que reduzca su rapidez, la Luna o cualquier satélite terrestre "cae" alrededor de la Tierra de manera indefinida. De igual modo, los planetas continuamente caen alrededor del Sol en trayectorias cerradas. ¿Por qué los planetas no chocan con el Sol? No lo hacen debido a sus velocidades tangenciales. ¿Qué ocurriría si sus velocidades tangenciales se redujeran a cero? La respuesta es muy simple: caerían en línea recta hacia el Sol y de hecho chocarían con él. Cualquier objeto en el sistema solar sin suficiente velocidad tangencial hace mucho tiempo que habría chocado con el Sol. Lo que queda es la armonía que observas.

**PUNTO DE CONTROL**

**Una de las bellezas de la física es que suele haber diferentes formas de ver y explicar un fenómeno dado. ¿La siguiente explicación es válida? Los satélites permanecen en órbita en lugar de caer a la Tierra porque están lejos del tirón principal de la gravedad de la Tierra.**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

¡No, no y mil veces no! Si un objeto en movimiento estuviera lejos del tirón de la gravedad, se movería en línea recta y no seguiría la curvatura de la Tierra. Los satélites permanecen en órbita porque *son* jalados por la gravedad, no porque estén fuera de ella. Para las altitudes de la mayor parte de los satélites terrestres, el campo gravitacional de la Tierra sólo es un pequeño porcentaje más débil de lo que es en la superficie de la Tierra.

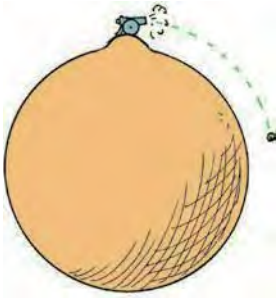


**FIGURA 10.21**
Disparada con suficiente rapidez, la bala de cañón entrará en órbita.

## 10.3 Órbitas satelitales circulares

Una bala de cañón disparada horizontalmente a 8 km/s desde la montaña de Newton seguiría la curvatura de la Tierra y se deslizaría en una trayectoria circular alrededor de la Tierra una y otra vez (siempre que el artillero y el cañón salieran de su camino). Disparada con una rapidez más lenta, la bala de cañón golpearía la superficie de la Tierra; disparada con una rapidez mayor, llegaría más allá de la órbita circular, como verás dentro de poco. Newton calculó la rapidez para una órbita circular, y dado que tal velocidad de bala de cañón evidentemente era imposible, no previó la posibilidad de que los seres humanos lanzaran satélites (y probablemente no pensó en cohetes multietapas).

Observa que, en una órbita circular, la rapidez de un satélite no cambia por la gravedad: la gravedad sólo cambia la dirección. Puedes entender esto si comparas un satélite en órbita circular con una bola de boliche que rueda por una bolera. ¿Por qué la gravedad que actúa sobre la bola de boliche no cambia su rapidez? La respuesta es que la gravedad jala recto hacia abajo sin ningún componente de fuerza que actúe hacia adelante o hacia atrás.

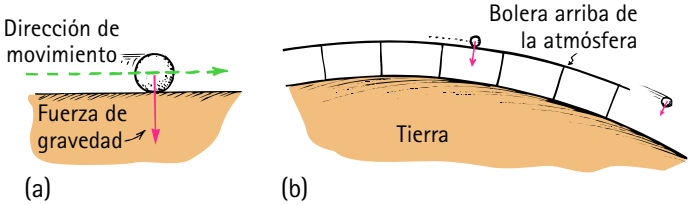



**FIGURA 10.22**
(a) La fuerza de gravedad sobre la bola de boliche está a 90° respecto de su dirección de movimiento, de modo que no tiene ningún componente de fuerza que la jale hacia adelante o atrás, y la bola rueda con rapidez constante. (b) Lo mismo sucede incluso si la bolera es más grande y permanece "pareja" con la curvatura de la Tierra.

**VIDEO: Órbitas circulares**

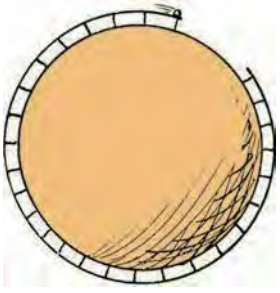


**FIGURA 10.23**
¿Qué rapidez permitirá que la bola libre la brecha?

Piensa en una bolera que circunda por completo la Tierra, elevada lo suficiente como para estar arriba de la atmósfera y de la resistencia del aire. La bola de boliche rodará con rapidez constante a lo largo de la bolera. Si una parte de la bolera se recortara, la bola se saldría por la orilla y golpearía el suelo. Una bola más rápida que encontrara la brecha golpearía el suelo más lejos a lo largo de la brecha. ¿Existe una rapidez a la cual la bola libre la brecha (como un motociclista que salta de una rampa y libra una brecha para encontrar una rampa en el otro lado)? La respuesta es sí: 8 km/s será la rapidez suficiente para librar cualquier brecha, incluso una brecha de 360°. La bola estaría en órbita circular.

Observa que un satélite en órbita circular siempre se mueve en una dirección perpendicular a la fuerza de gravedad que actúa sobre él. El satélite no se mueve en la dirección de la fuerza, lo que aumentaría su rapidez, ni se mueve en una dirección contra la fuerza, lo que reduciría su rapidez. En vez de ello, el satélite se mueve en ángulos rectos con respecto a la fuerza gravitacional que actúa sobre él. No ocurre cambio de rapidez, sólo un cambio de dirección. Ahora ves por qué un satélite en órbita circular navega paralelo a la superficie de la Tierra con rapidez constante, una forma muy especial de caída libre.

Para un satélite que está cerca de la Tierra, el periodo (el tiempo necesario para una órbita completa en torno a la Tierra) es de aproximadamente 90 minutos. Para altitudes mayores, la rapidez orbital es menor, la distancia es mayor y el periodo es más largo. Por ejemplo, los satélites de comunicaciones ubicados en órbita a 5.6 radios terrestres sobre la superficie de la Tierra tienen un periodo de 24 horas. Este periodo coincide con el periodo de rotación diario de la Tierra. Para una órbita alrededor del ecuador, dichos satélites siempre permanecen arriba del mismo punto sobre el suelo. La Luna está incluso

**SCREENCAST: Rapidez de satélite**

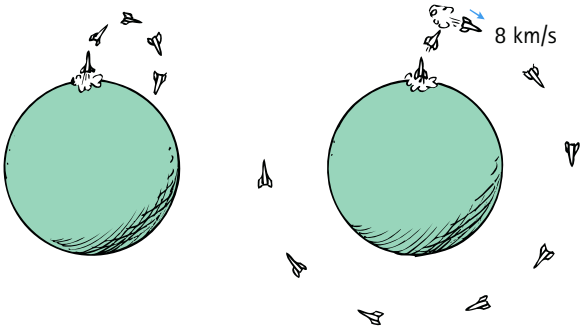



**FIGURA 10.24**
El empuje inicial del cohete lo lanza por encima de la atmósfera. Se necesita otro empuje para que alcance una rapidez tangencial de al menos 8 km/s si se quiere que el cohete caiga alrededor en vez de hacerlo hacia la Tierra.

más lejos y tiene un periodo de 27.3 días. Cuanto más alta sea la órbita de un satélite, menor será su rapidez, más larga será su trayectoria y más largo será su periodo.[1]

Poner un satélite en órbita terrestre exige controlar la rapidez y la dirección del cohete que lo lleva encima de la atmósfera. Un cohete disparado en un inicio en sentido vertical se inclina intencionalmente del curso vertical. Luego, una vez arriba de la resistencia de la atmósfera, se dirige horizontalmente, después de lo cual al satélite se le da un empuje final para que alcance la rapidez orbital. Esto se ve en la Figura 10.24, donde, por cuestiones de simplicidad, el satélite es de una sola etapa. Con la velocidad tangencial correcta, cae alrededor de la Tierra, en lugar de hacerlo hacia ella, y se convierte en un satélite terrestre.

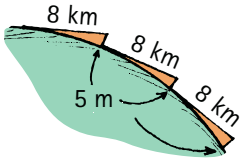
El ascenso vertical inicial lleva a un cohete rápidamente a través de la parte más densa de la atmósfera. Con el tiempo, el cohete debe adquirir suficiente rapidez tangencial para permanecer en órbita sin empuje, de modo que debe inclinarse hasta que su trayectoria sea paralela a la superficie de la Tierra.

## PUNTO DE CONTROL

1. **Cierto o falso: los vehículos espaciales orbitan a altitudes superiores a los 150 km para estar arriba tanto de la gravedad como de la atmósfera terrestre.**
2. **Los satélites en órbita circular cercana caen aproximadamente 5 m durante cada segundo de órbita. ¿Por qué esta distancia no se acumula y envía a los satélites a chocar en la superficie de la Tierra?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Falso. Los satélites están arriba de la atmósfera y de la resistencia del aire, ¡*no* de la gravedad! Es importante señalar que la gravedad de la Tierra se extiende por todo el Universo de acuerdo con la ley del inverso al cuadrado.
2. En cada segundo, el satélite cae aproximadamente 5 m debajo de la tangente en línea recta que habría seguido si no hubiera gravedad. La superficie de la Tierra también se curva 5 m bajo una tangente recta de 8 km. El proceso de caer con la curvatura de la Tierra continúa de tangente a tangente, de modo que la trayectoria curva del satélite y la curva de la superficie de la Tierra "coinciden" todo el tiempo alrededor del planeta. De hecho, los satélites chocan con la superficie de la Tierra algunas veces, esto sucede cuando encuentran resistencia del aire en la atmósfera superior que reduce su rapidez orbital.




[1]La rapidez de un satélite en órbita circular está dada por $v = \sqrt{\frac{GM}{d}}$ y el periodo del movimiento del satélite está dado por $T = 2\pi\sqrt{\frac{d^3}{GM}}$, donde $G$ es la constante de gravitación universal (consulta el Capítulo 9), $M$ es la masa de la Tierra (o cualquier cuerpo que orbite el satélite) y $d$ es la distancia del satélite respecto del centro de la Tierra u otro cuerpo que orbite.

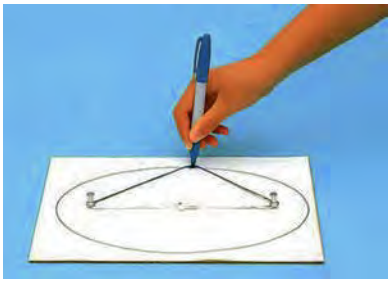


**FIGURA 10.25**
Un método simple para construir una elipse.

**FIGURA 10.26**
Tres lámparas que iluminan sobre la bola proyectan sombras que son todas elipses.

**SCREENCAST:** Órbita circular/elíptica

## 10.4 Órbitas elípticas

Si a un proyectil justo arriba de la resistencia de la atmósfera se le da una rapidez horizontal un poco mayor que 8 km/s, saldrá de una trayectoria circular y trazará una trayectoria oval llamada **elipse**. Una elipse es una curva específica: la trayectoria cerrada seguida por un punto que se mueve en tal forma que la suma de sus distancias desde dos puntos fijos (llamados *focos*) es constante. Para un satélite que orbita un planeta, un foco está en el centro del planeta; el otro foco podría ser interno o externo al planeta. Una elipse puede construirse fácilmente con un par de tachuelas (una en cada foco), un trozo de cuerda y una pluma o marcador (Figura 10.25). Cuanto más juntos estén los focos uno de otro, la elipse estará más cerca de ser un círculo. Cuando ambos focos coinciden, la elipse es un círculo. Así que puedes ver que un círculo es un caso especial de elipse.

Mientras que la rapidez de un satélite es constante en una órbita circular, la rapidez varía en una órbita elíptica. Cuando la rapidez inicial es mayor que 8 km/s, el satélite sale de una trayectoria circular y se aleja de la Tierra, contra la fuerza de gravedad. Por tanto pierde rapidez. La rapidez que pierde al alejarse vuelve a ganarla cuando cae de vuelta hacia la Tierra, y al final recupera su trayectoria original con la misma rapidez que tenía en un inicio (Figura 10.27). El procedimiento se repite una y otra vez, y en cada ciclo se traza una elipse.

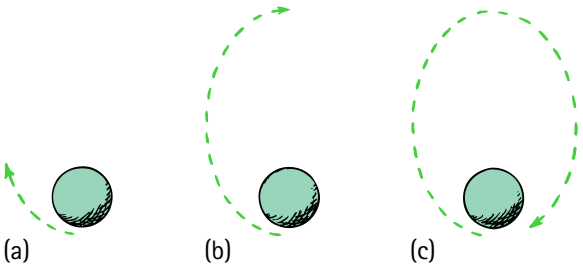



**FIGURA 10.27**
Órbita elíptica. (a) Un satélite terrestre que tiene una rapidez un poco mayor que 8 km/s sale de una órbita circular y se aleja de la Tierra. (b) La gravedad frena al satélite hasta el punto donde ya no puede alejarse más de ella. (c) Cae hacia la Tierra, recupera la rapidez que pierde al alejarse, y sigue la misma trayectoria que antes en un ciclo repetitivo.

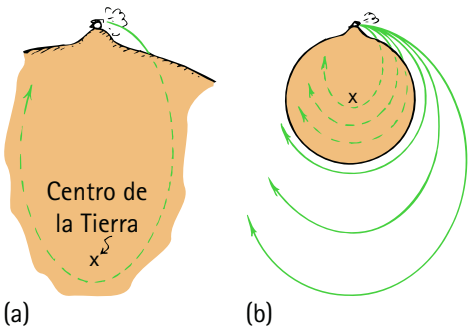
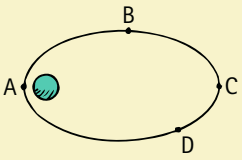



**FIGURA 10.28**
(a) La trayectoria de la bala de cañón, aunque se aproxima a una parábola, en realidad es parte de una elipse. El centro de la Tierra es el foco lejano. (b) Todas las trayectorias de la bala de cañón son elipses. Para rapideces menos que orbitales, el centro de la Tierra es el foco lejano; para una órbita circular, ambos focos son el centro de la Tierra; para rapideces mayores, el foco cercano es el centro de la Tierra.

Es muy interesante que la trayectoria parabólica de un proyectil, como una pelota de béisbol lanzada o una bala de cañón, en realidad es un pequeño segmento de una elipse esmirriada (delgada) que se extiende dentro y justo más allá del centro de la Tierra (Figura 10.28a). En la Figura 10.28b se ven varias trayectorias de balas de cañón disparadas desde la montaña de Newton. Para todas esas elipses el centro de la Tierra es un foco. A medida que aumenta la velocidad de salida, las elipses son menos excéntricas (casi más circulares); cuando la velocidad de salida alcanza 8 km/s, la elipse se convierte en círculo y no interseca la superficie de la Tierra. La bala de cañón viaja en una órbita circular. A mayores velocidades de salida, las balas de cañón en órbita trazan las conocidas elipses externas.

**PUNTO DE CONTROL**

**En el dibujo se muestra la trayectoria orbital de un satélite. ¿En cuál de las posiciones marcadas, de la A a la D, el satélite tiene la mayor rapidez? ¿La menor rapidez?**




**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

El satélite tiene su mayor rapidez cuando pasa por la posición A y tiene su menor rapidez en la posición C. Después de pasar C gana rapidez conforme cae de vuelta hacia A para repetir su ciclo.

## MONITORIZACIÓN MUNDIAL VÍA SATÉLITE

Los satélites ayudan a monitorizar el planeta. La Figura A muestra la trayectoria trazada en un periodo por un satélite en órbita circular lanzado en una dirección hacia el noreste desde Cabo Cañaveral, Florida. La trayectoria es curva sólo porque el mapa es plano. Observa que la trayectoria cruza el ecuador dos veces en un periodo, porque ésta describe un círculo cuyo plano atraviesa el centro de la Tierra. Observa también que la trayectoria no termina donde comienza. Esto se debe a que la Tierra gira bajo el satélite mientras éste la orbita. Durante el periodo de 90 minutos, la Tierra gira 22.5°, de modo que, cuando el satélite completa una órbita, comienza su nuevo barrido muchos kilómetros al oeste (aproximadamente 2,500 km en el ecuador). Esto es muy ventajoso para los satélites que monitorizan la Tierra. La Figura B muestra el área monitorizada durante 10 días mediante barridos sucesivos para un satélite típico.

**FIGURA A**

Trayectoria de un satélite típico lanzado en una dirección hacia el noreste desde Cabo Cañaveral. Puesto que la Tierra gira mientras el satélite está en órbita, cada barrido pasa por arriba unos 2,100 km más hacia el oeste a la latitud de Cabo Cañaveral.

Un ejemplo asombroso pero común de tal monitorización fue la observación en todo el mundo durante 3 años de la distribución del fitoplancton marino (Figura C). Tal información tan extensa habría sido imposible de adquirir antes de la llegada de los satélites.

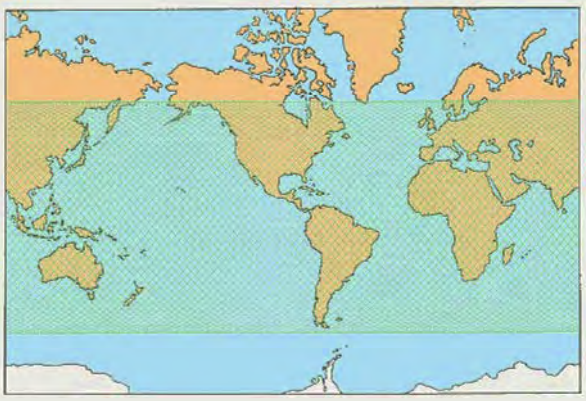


**FIGURA B**

Patrón de barrido típico de un satélite durante el periodo de una semana.

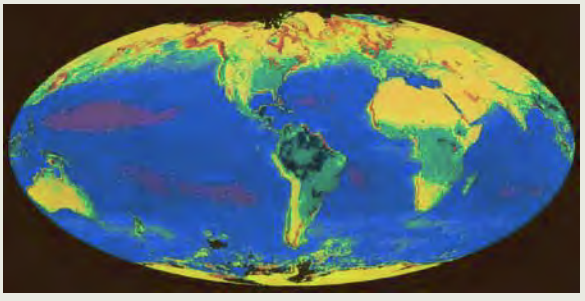


**FIGURA C**

Producción de fitoplancton en los océanos de la Tierra durante un periodo de 3 años. Magenta y amarillo indican las mayores concentraciones, mientras que azul indica concentraciones moderadamente altas.

Tycho Brahe (1546-1601)

Johannes Kepler (1571-1630)

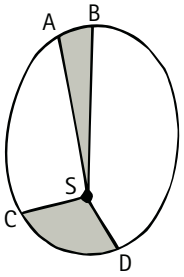



**FIGURA 10.29**
Áreas iguales barridas en intervalos de tiempo iguales.

## 10.5 Leyes de movimiento planetario de Kepler

La ley de gravitación de Newton estuvo precedida por tres importantes descubrimientos acerca del movimiento planetario que hizo el astrónomo alemán Johannes Kepler, quien comenzó como asistente del afamado astrónomo danés Tycho Brahe. Brahe dirigió el primer gran observatorio del mundo, en Dinamarca, justo antes del advenimiento del telescopio. Con enormes instrumentos de latón parecidos a compases, llamados *cuadrantes*, Brahe midió las posiciones de los planetas durante 20 años con tanta exactitud que sus mediciones todavía son válidas en la actualidad. Brahe confió sus datos a Kepler. Después de la muerte de Brahe, Kepler convirtió las mediciones de Brahe en valores que obtendría un observador estacionario afuera del sistema solar. La expectativa de Kepler de que los planetas se movían en círculos perfectos alrededor del Sol fue echada por tierra después de años de esfuerzo. Descubrió que las trayectorias eran elipses. Ésta es la primera ley del movimiento planetario de Kepler:

**La trayectoria de todos los planetas alrededor del Sol es una elipse y el Sol es uno de sus focos.**

Kepler también descubrió que los planetas no giran alrededor del Sol con una rapidez uniforme, sino que se mueven más rápido cuando están más cerca del Sol y más lento cuando están más lejos del Sol. Lo hacen de tal forma que una línea o rayo imaginario que une al Sol y al planeta barre áreas iguales de espacio en tiempos iguales. El área triangular barrida durante un mes cuando un planeta orbita lejos del Sol ("triángulo" ASB de la Figura 10.29) es igual al área triangular barrida durante un mes cuando el planeta orbita más cerca del Sol ("triángulo" CSD de la Figura 10.29). Ésta es la segunda ley de Kepler:

**La línea entre el Sol y cualquier planeta barre áreas iguales de espacio en iguales intervalos de tiempo.**

Kepler fue el primero en acuñar la palabra *satélite.* No tenía una idea clara de *por qué* los planetas se movían como él lo descubrió. Al carecer de un modelo conceptual, no pudo ver que un satélite era tan sólo un proyectil bajo la influencia de una fuerza gravitacional dirigida hacia el cuerpo que el satélite orbita. Tú sabes que, si lanzas una roca hacia arriba, irá más lento mientras más alto se eleve porque se mueve contra la gravedad. Y sabes que, cuando la roca regresa, se mueve con la gravedad y su rapidez aumenta. Kepler no vio que un satélite se comportaba como un proyectil, aunque se dio cuenta de que un planeta frenaba al alejarse del Sol y adquiría rapidez cuando se aproximaba al Sol. Un satélite, ya sea un planeta que orbita al Sol o uno de los satélites actuales que orbitan la Tierra, se mueve más lento contra el campo gravitacional y más rápido a favor del campo. Kepler no vio esta simplicidad y entonces fabricó complejos sistemas de figuras geométricas para dar sentido a sus descubrimientos. Dichos sistemas resultaron ser falsos.

Después de buscar durante 10 años, mediante ensayo y error, una relación entre el tiempo que tarda un planeta en orbitar el Sol y su distancia del Sol, Kepler descubrió una tercera ley. Por los datos de Brahe, Kepler descubrió que el periodo de cualquier planeta ($T$) se relaciona con su distancia promedio del Sol ($r$). La tercera ley es:

**El cuadrado del periodo orbital de un planeta es directamente proporcional al cubo de la distancia promedio del planeta del Sol ($T^2 \sim r^3$ para todos los planetas).**

Esto significa que la razón $T^2/r^3$ es la misma para todos los planetas. De modo que, si se conoce el periodo de un planeta, su distancia radial orbital promedio se calcula con facilidad (y viceversa).

Al conocer el tamaño y el periodo de la órbita de la Tierra, puedes usar la tercera ley de Kepler y el periodo orbital de un planeta para calcular su distancia promedio del Sol.

## CÓMO ENCONTRAR TU CAMINO

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) es un sistema de navegación basado en satélites que consta de 24 satélites colocados en órbita por el Departamento de Defensa estadounidense. Originalmente dirigido a aplicaciones militares, en la década de 1980 el sistema se puso a disposición de usos civiles. El GPS funciona en cualquier condición climática, en cualquier parte del mundo, las 24 horas del día. Los satélites GPS dan vuelta a la Tierra dos veces al día en órbitas muy precisas a unos 20,000 km de altura, mucho más alto que la Estación Espacial Internacional y un poco más de la mitad de alto que los satélites geoestacionarios. Los satélites GPS transmiten información de las señales a los dispositivos GPS de la Tierra, que "triangulan" la ubicación exacta del usuario al comparar el tiempo cuando un satélite transmitió una señal con el tiempo cuando la recibió. La diferencia de tiempo indica al receptor GPS la distancia del satélite. Después, con mediciones de distancia de algunos satélites más, el receptor GPS determina la posición del usuario y la muestra en el mapa electrónico de la unidad.

Un receptor GPS debe acoplarse a la señal de al menos tres satélites para calcular una posición bidimensional (latitud y longitud) y rastrear el movimiento. Con cuatro o más satélites a la vista, el receptor puede determinar la posición en tres dimensiones del usuario (latitud, longitud y altitud). Una vez determinada la posición del usuario, la unidad GPS puede calcular otra información, como rapidez, dirección, vía, distancia del viaje, distancia al destino, horas de la salida y la puesta de Sol, y más.

Es interesante observar que Kepler estaba familiarizado con las ideas de Galileo acerca de la inercia y el movimiento acelerado, pero no consiguió aplicarlas a su propio trabajo. Al igual que Aristóteles, pensó que la fuerza sobre un cuerpo en movimiento estaría en la misma dirección que el movimiento del cuerpo. Kepler nunca percibió el concepto de inercia. Galileo, por otra parte, nunca apreció la obra de Kepler y mantuvo su convicción de que los planetas se movían en círculos.[2] Para comprender mejor el movimiento planetario se necesitaba de alguien que integrara los hallazgos de estos dos grandes científicos.[3] El resto es historia, pues esta tarea recayó en Isaac Newton.

**pti**

- En 2009, 400 años después de que Galileo inventara el telescopio, Estados Unidos lanzó un telescopio orbital llamado Kepler, específicamente para ver planetas parecidos a la Tierra ocultos por la luz de sus soles.

## 10.6 Conservación de energía y movimiento de satélites

Recuerda, del capítulo 7, que un objeto en movimiento posee energía cinética (EC) debida a su movimiento. Un objeto arriba de la superficie de la Tierra tiene energía potencial (EP) en virtud de su posición. En todas las partes de su órbita, un satélite tiene tanto EC como EP. La suma de EC y EP es una constante a todo lo largo de la órbita. El caso más simple es el de un satélite en órbita circular.

En una órbita circular, la distancia entre el satélite y el centro del cuerpo que lo atrae no cambia, lo que significa que la EP del satélite es la misma en toda su órbita. Entonces, por la conservación de la energía, la EC también debe ser constante. De modo que un satélite en órbita circular viaja con EP, EC y rapidez invariables (Figura 10.30).

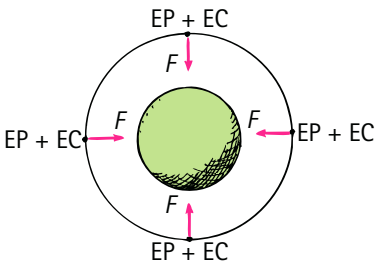



**FIGURA 10.30**
La fuerza de gravedad sobre el satélite siempre es hacia el centro del cuerpo que orbita. Para un satélite en órbita circular, no hay ningún componente de fuerza que actúe a lo largo de la dirección de movimiento. La rapidez, y por tanto la EC, no cambian.

[2]No es fácil observar las cosas que conocemos a través de las nuevas ideas de otros. Uno tiende a ver sólo lo que aprendió a ver o quiere ver. Galileo señaló que muchos de sus colegas no podían, o no querían, ver las lunas de Júpiter cuando entornaron sus ojos con escepticismo a través de sus telescopios. Los telescopios de Galileo fueron una bendición para la astronomía, pero más importante que un instrumento perfeccionado para ver con más claridad las cosas era una nueva forma de comprender lo que se veía. ¿Esto todavía es válido en la actualidad?

[3]Tal vez tu instructor te muestre que la tercera ley de Kepler resulta cuando la fórmula del inverso al cuadrado de Newton para la fuerza gravitacional se iguala con la fuerza centrípeta, y cómo es igual a una constante que sólo depende de $G$ y $M$, la masa del cuerpo en torno al cual ocurre la órbita. ¡Intrigante asunto!

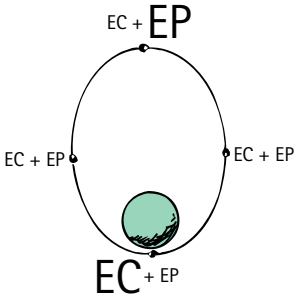



**FIGURA 10.31**
La suma de EC y EP para un satélite es una constante en todos los puntos a lo largo de su órbita.

En una órbita elíptica, la situación es diferente. Tanto la rapidez como la distancia varían. La EP es mayor cuando el satélite está más alejado (en su *apogeo*) y menor cuando el satélite está más cerca (en su *perigeo*). Observa que la EC será mínima cuando la EP sea máxima, y la EC será máxima cuando la EP sea mínima. En cada punto de la órbita, la suma de EC y EP es la misma (Figura 10.31).

En todos los puntos a lo largo de la órbita elíptica, excepto en el apogeo y el perigeo, existe una componente de fuerza gravitacional paralela a la dirección de movimiento del satélite. Este componente de fuerza cambia la rapidez del satélite. O es posible decir que (esta componente de fuerza) × (distancia recorrida) = ΔEC. De cualquier forma, cuando el satélite gana altitud y se mueve contra este componente, su rapidez y EC disminuyen. La disminución continúa hacia el apogeo. Una vez pasado el apogeo, el satélite se mueve en la misma dirección que la componente, y la rapidez y EC aumentan. El aumento continúa hasta que el satélite pasa el perigeo y el ciclo se repite.

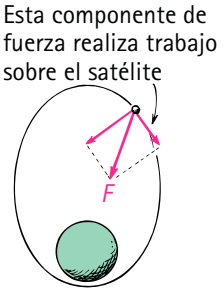
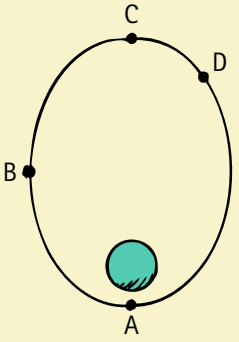



**FIGURA 10.32**
En una órbita elíptica, una componente de fuerza existe a lo largo de la dirección de movimiento del satélite. Este componente cambia la rapidez y, por tanto, la EC. (La componente perpendicular sólo cambia la dirección.)

**PUNTO DE CONTROL**

1. **En el dibujo se muestra la trayectoria orbital de un satélite. ¿En cuál posición marcada, de la A a la D, el satélite tiene mayor EC? ¿Mayor EP? ¿Mayor energía total?**
2. **¿Por qué la fuerza de gravedad cambia la rapidez de un satélite cuando está en una órbita elíptica pero no cuando está en una órbita circular?**




**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La EC es máxima en el perigeo A; la EP es máxima en el apogeo C, y la energía total es la misma en todas partes de la órbita.
2. En una órbita circular, la fuerza gravitacional siempre es perpendicular a la trayectoria orbital. Sin componente de fuerza gravitacional a lo largo de la trayectoria, sólo cambia la dirección de movimiento, no la rapidez. Sin embargo, en órbita elíptica, el satélite se mueve en direcciones que no son perpendiculares a la fuerza de gravedad. Entonces las componentes de fuerza sí existen a lo largo de la trayectoria, lo que cambia la rapidez del satélite. Una componente de fuerza a lo largo de (paralela a) la dirección de movimiento del satélite hace trabajo para cambiar su EC.

## 10.7 Rapidez de escape

Se sabe que una bala de cañón disparada horizontalmente a 8 km/s desde la montaña de Newton se pondría en órbita. ¿Pero qué ocurriría si la bala se disparara con la misma rapidez *verticalmente*? Se elevaría hasta cierta altura máxima, invertiría su dirección y luego caería de vuelta a la Tierra. Entonces el viejo dicho "todo lo que sube tiene que bajar" sería cierto, tan seguramente como que una piedra lanzada hacia arriba regresará por la gravedad (a menos, como verás, que su rapidez sea suficientemente grande).

¿No le habría encantado a Newton ver el movimiento de satélites en términos de *energía*, un concepto que llegó mucho después?

En la era actual de vuelos espaciales, es más exacto decir "todo lo que sube *puede* bajar", pues existe una rapidez inicial crítica que permite que un proyectil supere la gravedad y escape de la Tierra. Esta rapidez crítica se llama **rapidez de escape** o, si se involucra la dirección, *velocidad de escape*. Desde la superficie de la Tierra, la

rapidez de escape es de 11.2 km/s. Si lanzas un proyectil a una rapidez mayor, dejará la Tierra y viajará cada vez más lento, pero nunca se detendrá debido a la gravedad de la Tierra.[4] Se puede entender la magnitud de esta rapidez desde un punto de vista energético.

¿Cuánto trabajo se necesitaría para levantar una carga contra la fuerza de gravedad de la Tierra hasta una distancia muy, muy lejana ("infinitamente lejana")? Puedes pensar que el cambio en EP sería infinito porque la distancia es infinita. Pero la gravedad disminuye con la distancia por la ley del inverso al cuadrado. La fuerza de gravedad sobre la carga sería intensa sólo cerca de la Tierra. La mayor parte del trabajo realizado al lanzar un cohete ocurre a unos 10,000 km de la Tierra. Resulta que el cambio de EP de un cuerpo de 1 kg movido desde la superficie de la Tierra hasta una distancia infinita es 63 millones de joules (63 MJ). De modo que para levantar una carga infinitamente lejos de la superficie de la Tierra se necesitan al menos 63 MJ de energía por kilogramo de carga. En la práctica, esta energía se suma a lo largo de una distancia a medida que la carga se levanta de la superficie de la Tierra. Pero uno puede imaginar que se lanza la carga como una bala de cañón, con suficiente rapidez inicial que la ponga a viajar una gran distancia. Resulta que, en ausencia de resistencia aerodinámica, la rapidez de lanzamiento de la carga, sin importar su masa, debe ser al menos de 11.2 km/s. Ésta es la llamada rapidez de escape de la superficie de la Tierra.[5]

Si a una carga se le da más energía que 63 MJ por kilogramo conforme abandona la Tierra o, para el lanzamiento de una hipotética bala de cañón, más rapidez que 11.2 km/s, entonces, si desprecias la resistencia aerodinámica, la carga escapará de la Tierra, para nunca regresar. A medida que continúa avanzando hacia el exterior, su EP aumenta y su EC disminuye. Su rapidez se vuelve cada vez menor, aunque nunca se reduce a cero. La carga supera la gravedad de la Tierra. Escapa.

En la Tabla 10.1 se presentan las rapideces de escape de varios cuerpos en el sistema solar. Observa que la rapidez de escape de la superficie del Sol es 618 km/s. Incluso a 150,000,000 km de distancia del Sol (distancia de la Tierra), la rapidez de

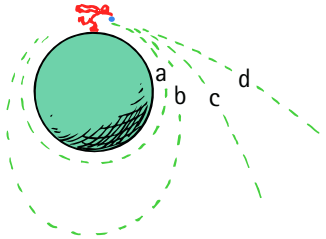
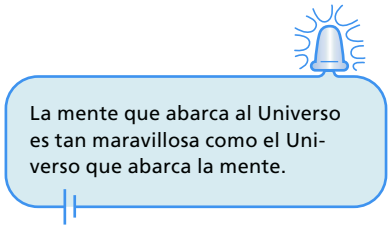



**FIGURA 10.33**
(a) Si Superman lanza una bola a 8 km/s horizontalmente desde la cima de una montaña tan alta que está justo arriba de la resistencia del aire, entonces aproximadamente 90 minutos después puede darse la vuelta y atraparla (si desprecia la rotación de la Tierra). (b) Lanzada un poco más rápido, la bola adoptará una órbita elíptica y regresará en un tiempo ligeramente más largo. (c) Lanzada más rápido que 11.2 km/s, escapará de la Tierra. (d) Lanzada a más de 42.5 km/s, escapará del sistema solar.

**TABLA 10.1 RAPIDECES DE ESCAPE EN LA SUPERFICIE DE CUERPOS DEL SISTEMA SOLAR**

| Cuerpo astronómico | Masa (masas terrestres) | Radio (radios terrestres) | Rapidez de escape (km/s) |
|---|---|---|---|
| Sol | 333,000 | 109 | 618 |
| Sol (a distancia de la órbita terrestre) | | 23,500 | 42.2 |
| Júpiter | 318 | 11 | 59.5 |
| Saturno | 95.2 | 9.1 | 35.5 |
| Neptuno | 17.1 | 3.9 | 23.5 |
| Urano | 14.5 | 4.0 | 21.3 |
| Tierra | 1.00 | 1.00 | 11.2 |
| Venus | 0.82 | 0.95 | 10.4 |
| Marte | 0.11 | 0.53 | 5.0 |
| Mercurio | 0.055 | 0.38 | 4.3 |
| Luna | 0.0123 | 0.27 | 2.4 |




[4]La rapidez de escape de cualquier planeta o cualquier cuerpo está dada por $v = \sqrt{\frac{2MG}{d}}$, donde $G$ es la constante de gravitación universal, $M$ es la masa del cuerpo que atrae y $d$ es la distancia desde su centro. (En la superficie del cuerpo, $d$ simplemente es el radio del cuerpo.) Para una comprensión un poco más matemática, compara esta fórmula con la de la rapidez orbital en la nota al pie 1 algunas páginas atrás.

[5]Es muy interesante que esto bien puede llamarse la *máxima rapidez de caída*. Sin embargo, la rapidez de cualquier objeto lejos de la Tierra, liberado desde el reposo y que se le permita caer hacia la Tierra sólo bajo la influencia de la gravedad de la Tierra, no superaría 11.2 km/s. (Con fricción del aire, sería menos.)

escape para liberarse de la influencia del Sol es 42.5 km/s, mucho mayor que la rapidez de escape de la Tierra. Un objeto proyectado desde la Tierra con una rapidez mayor que 11.2 km/s pero menor que 42.5 km/s escapará de la Tierra mas no del Sol. En lugar de alejarse para siempre, ocupará una órbita alrededor del Sol.

**FIGURA 10.34**
La histórica sonda *Pioneer 10,* lanzada desde la Tierra en 1972, pasó al planeta más exterior en 1983 y ahora vaga por los confines exteriores del sistema solar.

La sonda *Pioneer 10,* que ahora está mucho más lejos que los grandes planetas, fue lanzada desde la Tierra en 1972 con una rapidez de sólo 15 km/s. El escape se logró al dirigir la sonda para pasar justo detrás del gigante Júpiter. Fue barrida por el gran campo gravitacional de Júpiter y adquirió rapidez en el proceso, similar al aumento de rapidez de una pelota de béisbol que encuentra un bate entrante (pero sin contacto físico). Su rapidez de partida de Júpiter aumentó lo suficiente para superar la rapidez de escape del Sol a la distancia de Júpiter. La *Pioneer 10* está en los confines exteriores del sistema solar y pasó las órbitas de Neptuno y Plutón en 1983. A menos que choque con otro cuerpo, vagará indefinidamente por el espacio interestelar. Como una botella lanzada al océano con una nota en su interior, la *Pioneer 10* contiene información acerca de la Tierra que puede ser de interés para los extraterrestres, con la esperanza de que un día sea "arrastrada" y se encuentre en alguna "playa" distante.

Es importante señalar que la rapidez de escape de un cuerpo es la rapidez inicial dada por un breve empuje, después del cual no hay fuerza que auxilie al movimiento. Uno podría escapar de la Tierra a *cualquier* rapidez sostenida mayor a cero, si se da el tiempo suficiente. Por ejemplo, supón que un cohete se lanza hacia un destino como la Luna. Si los motores del cohete se agotan cuando todavía esté cerca de la Tierra, el cohete necesita una rapidez mínima de 11.2 km/s. Pero si los motores del cohete pueden sostenerse durante largos periodos de tiempo, el cohete podría llegar a la Luna sin jamás lograr 11.2 km/s.

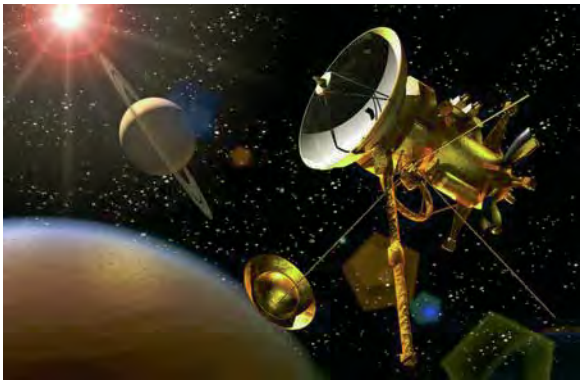


**FIGURA 10.35**
La nave espacial europeo-estadounidense *Cassini* transmite a la Tierra imágenes de acercamiento de Saturno y su luna gigante, Titán. También mide la temperatura superficial, los campos magnéticos y el tamaño, rapidez y trayectorias de pequeñas partículas espaciales circundantes.

Es interesante observar que la exactitud con la que un cohete no tripulado llega a su destino no se logra con permanecer en una trayectoria prevista de antemano o regresarlo a dicha trayectoria si el cohete sale de curso. No se hace ningún intento por regresar el cohete a su trayectoria original. En vez de ello, el centro de control en funciones pregunta: "¿Dónde está ahora y cuál es su velocidad? ¿Cuál es la mejor forma de llegar a su destino, dada su situación actual?" Con la ayuda de computadoras de gran rapidez, las respuestas a estas preguntas permiten encontrar una nueva trayectoria. Entonces, propulsores correctivos dirigen el cohete hacia esta nueva trayectoria. Este proceso se repite una y otra vez todo el camino hasta la meta.[6]

**pti**

- Así como los planetas caen alrededor del Sol, las estrellas caen alrededor de los centros de las galaxias. Las que no tienen suficiente rapidez tangencial son jaladas y engullidas por el núcleo galáctico, que es por lo general un agujero negro.

[6]¿Hay una lección que aprender aquí? Imagina que descubres que estás fuera de curso. Puedes, como el cohete, encontrar más provechoso seguir un curso que te conduzca a tu meta como mejor se ajuste de acuerdo con tu posición y circunstancias actuales, en lugar de tratar de regresar al curso que trazaste desde una posición anterior y, acaso, bajo circunstancias diferentes.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Proyectil.** Cualquier objeto que se mueve por el aire o el espacio bajo la influencia de la gravedad.

**Parábola.** Trayectoria curva seguida por un proyectil sólo bajo la influencia de gravedad constante.

**Satélite.** Proyectil o pequeño cuerpo celeste que orbita un cuerpo celeste más grande.

**Elipse.** Trayectoria oval que sigue un satélite. La suma de las distancias entre cualquier punto sobre la trayectoria y dos puntos llamados focos es una constante. Cuando los focos están juntos en un punto, la elipse es un círculo. A medida que los focos se separan, la elipse se vuelve más "excéntrica".

**Leyes de Kepler.** Ley 1: La trayectoria de cada planeta alrededor del Sol es una elipse y el Sol es uno de sus focos.

Ley 2: La línea entre el Sol y cualquier planeta barre áreas iguales de espacio en intervalos de tiempo iguales.

Ley 3: El cuadrado del periodo orbital de un planeta es directamente proporcional al cubo de la distancia promedio del planeta del Sol ($T^2 \sim r^3$ para todos los planetas).

**Rapidez de escape.** Rapidez que debe alcanzar un proyectil, sonda espacial u objeto similar para escapar a la influencia gravitacional de la Tierra o de otro cuerpo celeste al cual esté atraído.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 10.1 Movimiento de proyectiles

1. ¿Qué es exactamente un proyectil?
2. ¿Por qué la componente vertical de velocidad de un proyectil cambia con el tiempo, mientras que la componente horizontal de velocidad no cambia?
3. Una piedra se lanza hacia arriba en un ángulo. ¿Qué ocurre con la componente horizontal de su velocidad a medida que se eleva? ¿A medida que cae?
4. Una piedra se lanza hacia arriba en un ángulo. ¿Qué ocurre con la componente vertical de su velocidad a medida que se eleva? ¿A medida que cae?
5. Un proyectil cae por debajo de la trayectoria en línea recta que seguiría si no hubiera gravedad. ¿Cuántos metros cae bajo esta línea si ha viajado durante 1 s? ¿Durante 2 s?
6. ¿Tus respuestas a la pregunta anterior dependen del ángulo al que se lance el proyectil?
7. Un proyectil se lanza hacia arriba con un ángulo de 70° desde la horizontal y golpea el suelo a cierta distancia a lo lejos. ¿Con qué otro ángulo de lanzamiento, y con la misma rapidez, este proyectil aterrizaría igual de lejos?
8. Un proyectil se lanza verticalmente a 100 m/s. Si puedes despreciar la resistencia del aire, ¿con qué rapidez regresará a su nivel inicial?

### 10.2 Proyectiles con movimiento rápido: satélites

9. ¿Cómo un proyectil puede "caer alrededor de la Tierra"?
10. ¿Cómo se relaciona la curvatura de la Tierra con la rapidez necesaria para que un proyectil orbite la Tierra?
11. ¿Por qué es importante que el proyectil de la pregunta anterior esté por arriba de la atmósfera de la Tierra?

### 10.3 Órbitas satelitales circulares

12. ¿Por qué la fuerza de gravedad no cambia la rapidez de una bola de boliche cuando rueda por una bolera?
13. ¿Por qué la fuerza de gravedad no cambia la rapidez de un satélite en órbita circular?
14. ¿Cuánto tiempo tarda una revolución completa de un satélite en órbita cercana alrededor de la Tierra?
15. Para órbitas de mayor altitud, ¿el periodo es más largo o más corto?

### 10.4 Órbitas elípticas

16. ¿Por qué la fuerza de gravedad cambia la rapidez de un satélite en una órbita elíptica?
17. ¿En qué parte de una órbita elíptica un satélite terrestre tiene mayor rapidez? ¿Menor rapidez?

### 10.5 Leyes de movimiento planetario de Kepler

18. ¿Quién recopiló los datos que demostraron que los planetas viajan en trayectorias elípticas alrededor del Sol? ¿Quién descubrió las órbitas elípticas? ¿Quién las explicó?
19. ¿Qué descubrió Kepler acerca de los periodos de los planetas y sus distancias del Sol?
20. ¿Cuál fue la dirección de la fuerza sobre un planeta en el razonamiento de Kepler? ¿En el razonamiento de Newton?

### 10.6 Conservación de energía y movimiento de satélites

21. ¿Por qué la energía cinética es constante para un satélite en una órbita circular mas no para un satélite en una órbita elíptica?
22. ¿La suma de las energías cinética y potencial es una constante para los satélites en órbitas circulares, en órbitas elípticas o en ambas?

### 10.7 Rapidez de escape

23. La rapidez de escape de la Tierra es 11.2 km/s. ¿Es posible escapar de la Tierra a la mitad de esta rapidez? ¿A un cuarto de esta rapidez? Si es así, ¿cómo?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

24. Con una vara y cuerdas, fabrica una "vara de trayectoria" como la que se muestra en la página 187.
25. Con tus amigos, haz girar una cubeta de agua en un círculo vertical suficientemente rápido como para que el agua no se derrame. Mientras lo hacen, el agua de la cubeta *está* cayendo, pero con menos rapidez de la que le proporcionas a la cubeta. Indica cuál es la relación entre el balanceo de tu cubeta y el movimiento de los satélites: que los satélites en órbita caen continuamente hacia la Tierra, pero no con suficiente rapidez vertical como para acercarse más a la Tierra curva que está debajo. ¡Recuerda a tus amigos que la física tiene que ver con encontrar las conexiones en la naturaleza!

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

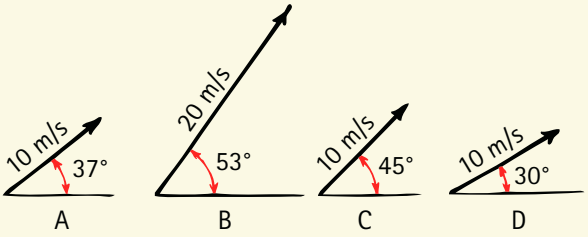
26. Una bola se lanza horizontalmente desde un risco con una rapidez de 10 m/s. Predices que su rapidez 1 s después será un poco mayor que 14 m/s. Tu amigo dice que será 10 m/s. Demuestra quién tiene la razón.
27. Estás en un avión que vuela horizontalmente con una rapidez de 1,000 km/h (280 m/s) cuando un motor se cae. Desprecia la resistencia del aire y supón que el motor tarda 30 s en golpear el suelo.
    a. Demuestra que el avión está a 4.5 km de altura.
    b. Demuestra que la distancia horizontal que recorre el motor del avión durante su caída es de 8,400 m.
    c. Si de algún modo el avión sigue volando como si nada ocurriera, ¿dónde está el motor en relación con el avión en el momento en que el motor golpea el suelo?
28. Bob Diana, en un coto de caza, dispara su rifle hacia un blanco a 200 metros de distancia. La bala se mueve horizontalmente desde el cañón del rifle con una rapidez de 400 m/s.
    a. ¿Cuánto cae la bala desde una trayectoria horizontal para cuando alcanza el blanco?
    b. Para golpear una diana, ¿por qué Bob ajusta su mirilla de modo que el cañón apunta un poco arriba cuando dispara al blanco?
29. Una pelota de béisbol disparada con una velocidad inicial de 141 m/s a un ángulo de 45° sigue una trayectoria parabólica y golpea un globo en lo más alto de su trayectoria. Desprecia la resistencia del aire y demuestra que la pelota golpea al globo con una rapidez de 100 m/s.
30. Los estudiantes en el laboratorio (Figura 10.5) miden la rapidez de una bola de acero en 8.0 m/s cuando se lanza horizontalmente desde una mesa de 1.0 m de alto. Su objetivo es colocar una lata de café de 20 cm de alto en el suelo para atrapar la bola. Demuestra que le atinan al blanco cuando la lata se coloca a 3.2 m de la base de la mesa.
31. En un punto particular de su órbita, un satélite en una órbita elíptica tiene una energía potencial gravitacional de 5,000 MJ con respecto a la superficie de la Tierra y una energía cinética de 4,500 MJ. Más tarde en su órbita, la energía potencial del satélite es de 6,000 MJ. ¿Cuál es su energía cinética en dicho punto?
32. Cierto satélite tiene una energía cinética de 8 mil millones de joules en el perigeo (el punto más cercano a la Tierra) y 5 mil millones de joules en el apogeo (el punto más alejado de la Tierra). Conforme el satélite viaja del apogeo al perigeo, ¿cuánto trabajo hace sobre él la fuerza gravitacional? ¿Su energía potencial aumenta o disminuye durante este tiempo, y en cuánto?
33. Calcula el tiempo en el aire ("tiempo de vuelo") de una persona que se mueve horizontalmente 3 m durante un salto de 1.25 m de alto. ¿Cuál es el tiempo en el aire cuando la persona se mueve 6 m horizontalmente durante este salto?
34. Una pelota de tenis que tiene un movimiento horizontal cuando libra la red a una altura $y$ por encima de la superficie de la cancha. Para aterrizar dentro de la cancha de tenis, la pelota no debe moverse muy rápido.
    a. Para permanecer dentro del límite de la cancha, a una distancia horizontal $d$ de la parte baja de la red, demuestra que la rapidez máxima de la pelota sobre la red es

$$v = \frac{d}{\sqrt{\frac{2y}{g}}}$$

    b. Supón que la altura de la red es de 1.00 m y que el límite de la cancha está a 12.0 m desde la parte baja de la red. Usa $g = 10\ \text{m/s}^2$ y demuestra que la rapidez máxima de la pelota que se mueve horizontalmente para librar la red es de aproximadamente 27 m/s (alrededor de 60 mi/h).
    c. ¿La masa de la pelota representa alguna diferencia? Defiende tu respuesta.

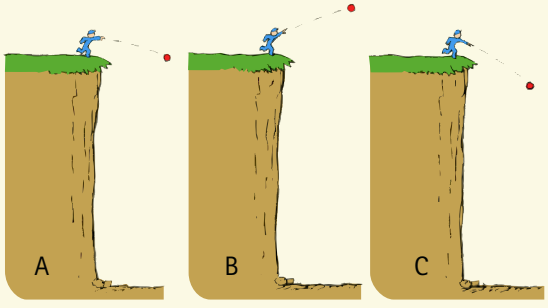
## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

35. Una bola se lanza hacia arriba con las velocidades y ángulos que se muestran. De mayor a menor, clasifícales por sus:



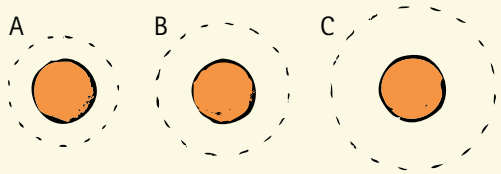

    a. componentes verticales de velocidad.
    b. componentes horizontales de velocidad.
    c. aceleraciones cuando llegan a lo alto de sus trayectorias.

36. Una bola se lanza desde el borde de un risco con la misma rapidez pero con diferentes ángulos, como se muestra. De mayor a menor, clasifica:



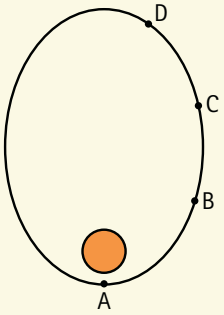

    a. las EP iniciales de las bolas en relación con el suelo bajo ellas.
    b. las EC iniciales de las bolas cuando se lanzan.
    c. las EC de las bolas cuando golpean el suelo bajo ellas.
    d. los tiempos de vuelo mientras están en el aire.

37. Las líneas punteadas muestran tres órbitas circulares alrededor de la Tierra. Clasifica las siguientes cantidades de mayor a menor:




a. Su rapidez orbital.
b. Su tiempo para orbitar la Tierra.

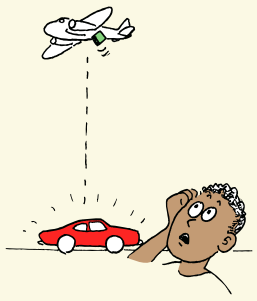
38. Se indican las posiciones de un satélite en una órbita elíptica. Clasifica estas cantidades de mayor a menor:




a. Fuerza gravitacional
b. Rapidez
c. Cantidad de movimiento
d. EC
e. EP
f. Energía total (EC + EP)
g. Aceleración

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

39. En los clavados sincronizados, los clavadistas permanecen en el aire durante el mismo tiempo. Sin resistencia aerodinámica, caerían juntos. Pero la resistencia aerodinámica es considerable y los clavadistas pueden diferir mucho en tamaño y peso, así que ¿cómo permanecen juntos en la caída?
40. Supón que ruedas una bola y sale de la mesa. ¿El tiempo para golpear el suelo dependerá de la rapidez de la bola? (¿Una bola rápida tardará más tiempo en golpear el suelo?) Defiende tu respuesta.
41. Supón que ruedas una bola y sale de una mesa. Comparada con una que rueda lentamente, ¿una bola que se mueve más rápido golpeará el suelo con mayor *rapidez*? Defiende tu respuesta.
42. Lanzas una bola verticalmente hacia arriba en un tren con movimiento uniforme, regresa a su lugar de partida. ¿Hará lo mismo si el tren acelera? Explica.
43. Una pesada caja cae accidentalmente de un avión que vuela alto justo cuando vuela directo sobre un brillante Porsche rojo perfectamente bien estacionado en un lote de autos. En relación con el Porsche, ¿dónde chocará la caja?

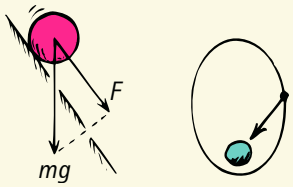


44. Imagina que sueltas un paquete de ayuda desde un avión que viaja con velocidad constante, y luego supón que la resistencia del aire no afecta al paquete que cae. ¿Cuál será su trayectoria de caída observada por alguien en reposo sobre el suelo, no directamente abajo sino a un lado donde hay una visión clara? ¿Cuál será la trayectoria vista por ti, que miras hacia abajo desde el avión? ¿Dónde golpeará el suelo el paquete, en relación contigo en el avión? ¿Dónde golpeará en el caso más realista en el que la resistencia del aire afecte la caída?
45. Fragmentos de fuegos artificiales iluminan hermosamente el cielo nocturno. (a) ¿Qué trayectoria específica traza de manera ideal cada fragmento? (b) ¿Qué trayectorias trazarían los fragmentos en una región sin gravedad?

46. En ausencia de resistencia del aire, ¿por qué la componente horizontal del movimiento de un proyectil no cambia, en tanto que la componente vertical sí cambia?
47. Si la resistencia aerodinámica puede ignorarse, ¿en qué punto de su trayectoria una pelota de béisbol bateada tiene su rapidez mínima? ¿Cómo se compara esto con la componente horizontal de su velocidad en otros puntos?
48. Cuando un fusil se dispara hacia un blanco distante, ¿por qué el cañón no se alinea de modo que apunte exactamente al blanco?
49. Dos golfistas golpean cada uno una bola con la misma rapidez, pero uno a 60° con la horizontal y el otro a 30°. ¿Cuál bola llegará más lejos? ¿Cuál golpea primero el suelo? (Ignora la resistencia del aire.)
50. Un guardia forestal dispara a un mono que cuelga de una rama de un árbol con un dardo tranquilizante. El guardia apunta directamente al mono, sin darse cuenta de que el dardo seguirá una trayectoria parabólica y por ende caerá abajo del mono. Sin embargo, el mono ve el dardo salir del arma y se suelta de la rama para evitar que lo alcance. ¿De cualquier forma el dardo alcanzará al mono? ¿La velocidad del dardo modifica tu respuesta, si supones que es tan

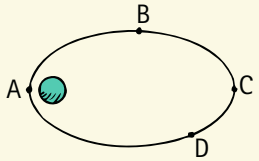
grande que recorre la distancia horizontal hasta el árbol antes de golpear el suelo? Defiende tu respuesta.

51. Un proyectil se dispara recto hacia arriba a 141 m/s. ¿Qué tan rápido se mueve en el instante en que alcanza la parte superior de su trayectoria? Supón que, en vez de ello, se dispara a 45° hacia arriba. Entonces su componente horizontal de velocidad sería 100 m/s. ¿Cuál sería la rapidez del proyectil en la parte superior de su trayectoria?
52. Cuando saltas hacia arriba, tu tiempo en el aire es el que tus pies están despegados del suelo. ¿El tiempo en el aire depende de tu componente vertical de velocidad cuando saltas, de tu componente horizontal de velocidad o de ambos? Defiende tu respuesta.
53. El tiempo en el aire de un jugador de básquetbol que salta una distancia vertical de 2 pies (0.6 m) es de aproximadamente $\frac{2}{3}$ segundos. ¿Cuál será el tiempo en el aire si el jugador alcanza la misma altura mientras salta 4 pies (1.2 m) horizontalmente?
54. Dado que la Luna es atraída gravitacionalmente hacia la Tierra, ¿por qué no simplemente choca con la Tierra?
55. ¿Cuáles planetas tienen un periodo de más de un año terrestre, los planetas más cercanos al Sol que la Tierra, o los planetas más alejados del Sol que la Tierra?
56. Cuando un satélite viaja en una órbita circular con rapidez constante alrededor de la Tierra, ¿acelera? Si es así, ¿en qué dirección? Si no, ¿por qué no?
57. ¿La rapidez de un objeto que cae depende de su masa? ¿La rapidez de un satélite en órbita depende de su masa? Defiende tus respuestas.
58. ¿De qué *no* depende la rapidez de un satélite en órbita: la masa del satélite, la masa de la Tierra o la distancia del satélite de la Tierra?
59. Un objeto que se mueve en círculos necesita una fuerza centrípeta. ¿Qué proporciona esta fuerza para satélites que orbitan la Tierra?
60. Si alguna vez has observado el lanzamiento de un satélite terrestre, es posible que hayas notado que el cohete parte verticalmente hacia arriba, luego se aleja de un curso vertical y continúa su ascenso con un ángulo. ¿Por qué parte verticalmente? ¿Por qué no continúa verticalmente?
61. Si una bala de cañón se dispara desde una alta montaña, la gravedad cambia su rapidez durante toda su trayectoria. Pero si se dispara tan rápido que entra en órbita circular, la gravedad no cambia su rapidez en absoluto. Explica.
62. Cuando un satélite en órbita circular frena, acaso debido al disparo de un "retrocohete", termina adquiriendo más rapidez de la que tenía en un inicio. ¿Por qué?
63. La Tierra está más cerca del Sol en diciembre que en junio. ¿En cuál de estos dos meses la Tierra se mueve más rápido alrededor del Sol?
64. Si desprecias la resistencia del aire, ¿un satélite podría ponerse en órbita en un túnel circular bajo la superficie de la Tierra? Discute.
65. En el dibujo de la izquierda, una bola gana EC cuando rueda por una colina porque la componente de peso ($F$) que actúa en la dirección de movimiento realiza trabajo. Traza la componente similar de la fuerza gravitacional que realiza trabajo para cambiar la EC del satélite a la derecha.




66. ¿Por qué la fuerza de gravedad realiza trabajo sobre un satélite cuando se mueve de una parte a otra en una órbita elíptica, pero no hay trabajo de por medio cuando se mueve de una parte a otra en una órbita circular?
67. ¿Cuál es la forma de la órbita cuando la velocidad del satélite en todas partes es perpendicular a la fuerza de gravedad?
68. Un satélite da vueltas a la Tierra a una distancia igual a la distancia Tierra-Luna, ¿cuánto tardará en hacer una órbita completa? En otras palabras, ¿cuál sería su periodo?
69. ¿Un satélite puede viajar en una órbita estable en un plano que no interseque el centro de la Tierra? Defiende tu respuesta.
70. ¿Qué ocurre con el periodo de un satélite terrestre cuando el satélite se pone en una órbita más alta?
71. Si un mecánico de vuelo suelta una caja de herramientas desde un jumbo jet que vuela muy alto, la caja choca con la Tierra. En 2008, un astronauta en el transbordador espacial en órbita accidentalmente soltó una caja de herramientas. ¿Por qué las herramientas no chocaron con la Tierra? Defiende tu respuesta.
72. ¿De qué manera un astronauta en un transbordador espacial podría "soltar" un objeto verticalmente hacia la Tierra?
73. Una nave espacial en una órbita alta viaja a 7 km/s con respecto a la Tierra. Supón que proyecta una cápsula hacia atrás a 7 km/s con respecto a la nave. Describe la trayectoria de la cápsula con respecto a la Tierra.
74. Un satélite en órbita circular alrededor de la Luna dispara una pequeña sonda en dirección opuesta a la velocidad del satélite. Si la rapidez de la sonda en relación con el satélite es la misma que la rapidez del satélite en relación con la Luna, describe el movimiento de la sonda. Si la rapidez relativa de la sonda es el doble de la rapidez del satélite, ¿por qué representaría un peligro para el satélite?
75. La velocidad orbital de la Tierra alrededor del Sol es de 30 km/s. Si la Tierra se detuviera de manera repentina en su recorrido, simplemente caería en sentido radial hacia el Sol. Un líder del congreso sugiere disparar un cohete cargado con desechos radiactivos hacia el Sol para su desecho permanente. Para que esto ocurra, ¿con qué rapidez y en qué dirección con respecto a la órbita de la Tierra debería dispararse el cohete?

76. Si detienes el movimiento de un satélite terrestre en su recorrido, simplemente chocaría con la Tierra. ¿Por qué, entonces, los satélites de comunicaciones que "flotan sin movimiento" arriba del mismo punto sobre la Tierra no chocan con la Tierra?
77. ¿Cuál es la ventaja de lanzar vehículos espaciales desde aeronaves de vuelo alto en lugar de hacerlo desde el suelo?
78. ¿Qué necesita menos combustible: lanzar un cohete a rapidez de escape desde la Luna o desde la Tierra? Defiende tu respuesta.
79. ¿Cuál es la máxima rapidez de impacto posible sobre la superficie de la Tierra para un cuerpo lejano inicialmente en reposo que cae a la Tierra en virtud sólo de la gravedad terrestre?
80. Como parte de su entrenamiento antes de ir a órbita, los astronautas experimentan ingravidez cuando montan en un avión que vuela a lo largo de la misma trayectoria parabólica que un proyectil en caída libre. Un compañero de clase dice que las fuerzas gravitacionales en todas partes dentro del avión durante esta maniobra se cancelan a cero. Otro compañero te mira buscando tu confirmación. ¿Cuál es tu respuesta?
81. ¿En cuál de las posiciones indicadas el satélite en una órbita elíptica experimenta la mayor fuerza gravitacional? ¿Tiene la mayor rapidez? ¿La mayor velocidad? ¿La mayor cantidad de movimiento? ¿La mayor energía cinética? ¿La mayor energía potencial gravitacional? ¿La mayor energía total? ¿La mayor cantidad de movimiento angular? ¿La mayor aceleración?




82. ¿En qué punto de su órbita elíptica alrededor del Sol la aceleración de la Tierra hacia el Sol es un máximo? ¿En qué punto es un mínimo? Defiende tus respuestas.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

83. Para un alcance máximo, un balón de fútbol debe patearse a aproximadamente 45° con la horizontal, un poco menos debido a la resistencia aerodinámica. Pero las patadas de despeje con frecuencia se patean a ángulos mayores que 45°. Discute por qué esto es así.
84. Un amigo afirma que las balas disparadas por algunos fusiles de alto poder viajan durante muchos metros en línea recta antes de comenzar a caer. Otro amigo contradice esta afirmación y manifiesta que todas las balas de cualquier fusil caen abajo de una trayectoria en línea recta una distancia vertical dada por $\frac{1}{2}gt^2$ y que la trayectoria curva es aparente para bajas velocidades y menos aparente para altas velocidades. Ahora es tu turno: discute si todas las balas disparadas caen o no la misma distancia vertical en tiempos iguales.
85. Marte tiene aproximadamente $\frac{1}{9}$ la masa de la Tierra. Si Marte de algún modo se colocara en la misma órbita que la de la Tierra, discute cuál sería la diferencia entre el tiempo que le tomaría dar una vuelta al Sol y el que le toma a la Tierra. (¿Más largo, más corto o el mismo?)
86. ¿La rapidez de un satélite en órbita circular cercana alrededor de Júpiter sería mayor, igual o menor a 8 km/s?
87. ¿Por qué, en general, para poner los satélites en órbita se disparan en una dirección hacia el este, la dirección en la que gira la Tierra? Y discute por qué las posiciones cercanas al ecuador son las favoritas.
88. Discute por qué Hawái es el sitio de lanzamiento más eficiente en Estados Unidos para los satélites no polares. En tu discusión incluye un vistazo al giro de la Tierra desde arriba de cualquier polo y compáralo con una tornamesa que gira.
89. Discute por qué un satélite puede orbitar a 5 km sobre la Luna, pero no a 5 km sobre la Tierra.
90. Un satélite de comunicaciones con un periodo de 24 horas flota sobre un punto fijo sobre la Tierra y, para los observadores terrestres, parece inmóvil. ¿Por qué se coloca sólo en una órbita en el plano del ecuador de la Tierra? En tu discusión, piensa que la órbita del satélite es un anillo que circunda la Tierra.
91. Un satélite terrestre "geosíncrono" puede permanecer casi directamente arriba de Singapur, mas no de San Francisco. Discute por qué esto es así.
92. En 2000-2001, la nave espacial *Near Earth Asteroid Rendezvous* (NEAR, Encuentro de Asteroides Cercanos a la Tierra) de la NASA orbitó alrededor del asteroide Eros, de 20 millas de largo. ¿Consideras que la rapidez orbital de esta nave espacial es mayor o menor que 8 km/s? Discute y defiende tu respuesta.
93. ¿Cuáles dos planetas nunca se ven a medianoche y por qué?
94. ¿Por qué un satélite se quema cuando desciende hacia la atmósfera? ¿Y por qué no se quema cuando asciende por la atmósfera?
95. ¿Un satélite puede mantener una órbita en el plano del Círculo Ártico? ¿Por qué sí o por qué no?
96. Lees en un artículo sobre astronautas de una importante revista que "aproximadamente 62 millas arriba, la atmósfera termina y la gravedad se vuelve muy débil...". ¿Qué error se comete aquí?
97. Discute el requisito de que un dispositivo GPS necesita información proveniente de al menos tres satélites GPS y por qué un satélite "muy bueno" no puede hacer la tarea.
98. En una explosión accidental, un satélite se rompe a la mitad mientras está en órbita circular alrededor de la Tierra. Una mitad queda momentáneamente en reposo. ¿Cuál es el destino de la mitad que queda en reposo? Discute lo que ocurre con la otra mitad.
99. Una gigantesca rueda giratoria en el espacio proporciona gravedad artificial para sus ocupantes, como se estudió en el Capítulo 8. En lugar de una rueda completa, discute la idea de un par de cápsulas unidas mediante una cuerda de sujeción y que giren una en torno a la otra. ¿Tal arreglo puede proporcionar gravedad artificial a los ocupantes?
100. Un cohete viaja en una órbita elíptica alrededor de la Tierra. A fin de lograr la mayor cantidad de EC para el escape con una cantidad dada de combustible, ¿debe disparar sus motores para acelerar hacia adelante cuando está en el apogeo o en el perigeo? (*Sugerencia:* guía tu razonamiento con la fórmula $Fd = \Delta EC$. Supón que el empuje $F$ es breve y de la misma duración en cualquier caso. Luego considera la distancia $d$ que recorrería el cohete durante esta breve explosión en el apogeo y en el perigeo.)

# PARTE UNO Examen de práctica de opción múltiple

*Elige la MEJOR respuesta para cada uno de los siguientes:*

1. El lenguaje de la ciencia es
   (a) matemáticas. (b) latín. (c) chino. (d) árabe.
2. Alguien que dice "eso es sólo una teoría" probablemente no sepa que una teoría científica es
   (a) una suposición informada.
   (b) una hipótesis.
   (c) una gran síntesis de hipótesis y hechos bien comprobados.
   (d) Ninguna de las anteriores.
3. La fuerza necesaria para mantener una bola rodando por una bolera
   (a) se debe a la gravedad.
   (b) es una fuerza inercial.
   (c) es una brisa ligera.
   (d) Ninguna de las anteriores.
4. La regla de equilibrio, $\Sigma F = 0$, se aplica a objetos
   (a) en reposo.
   (b) que se mueven con velocidad constante.
   (c) Ambas.
   (d) Ninguna.
5. Si la gravedad entre el Sol y la Tierra súbitamente desaparece, la Tierra seguiría moviéndose en
   (a) una curva.
   (b) una línea recta.
   (c) una espiral hacia afuera.
   (d) una espiral hacia adentro.
6. La rapidez promedio de una gacela que recorre una distancia de 2 km en un tiempo de media hora es
   (a) 1 km/h. (b) 2 km/h. (c) 4 km/h. (d) mayor que 4 km/h.
7. Un objeto en caída libre experimenta un aumento en
   (a) rapidez. (b) aceleración. (c) tanto rapidez como aceleración.
8. Dos vectores, uno de 3 N y el otro de 4 N, pueden tener una resultante de
   (a) 0 N. (b) 5 N. (c) 8 N. (d) Cualquiera de ellos.
9. Una fuerza de 10 N en un ángulo de 45° sobre la horizontal tiene una componente horizontal de aproximadamente
   (a) 7 N. (b) 5 N. (c) 10 N.
10. El hecho de que la aceleración de caída libre sea la misma para todas las masas se explica por la _____ de Newton.
    (a) primera ley (c) tercera ley
    (b) segunda ley (d) ley de acción-reacción
11. La cantidad de resistencia aerodinámica sobre una ardilla voladora de 0.8 N que se suelta verticalmente con velocidad terminal es
    (a) menor que 0.8 N.
    (b) 0.8 N.
    (c) más de 0.8 N.
    (d) depende de la orientación de su cuerpo.
12. Cuando una bala de cañón se dispara desde un cañón, tanto la bala como el cañón experimentan iguales
    (a) cantidades de fuerza. (c) Ambos.
    (b) aceleraciones. (d) Ninguna.
13. El equipo que gana en una competencia de jalar la cuerda es el equipo que
    (a) produce más tensión en la cuerda que el oponente.
    (b) empuja más duro sobre el suelo.
    (c) Ambos.
    (d) Ninguno.
14. Un avión con su nariz apuntando al norte, con una rapidez de viento de 40 km/h, en un viento cruzado (en ángulo recto) de 30 km/h, tiene una rapidez respecto del suelo de
    (a) 30 km/h. (b) 40 km/h. (c) 50 km/h. (d) 60 km/h.
15. La relación impulso-cantidad de movimiento es un resultado directo de la _____ de Newton.
    (a) primera ley (c) tercera ley
    (b) segunda ley (d) ley de gravedad
16. Un gran pez nada hacia un pequeño pez en reposo y lo traga. Justo después de almorzar, el gran pez engordado tiene un cambio de
    (a) rapidez. (c) Ambos.
    (b) cantidad de movimiento. (d) Ninguno.
17. El trabajo realizado sobre una caja de 100 kg que se eleva 2 m en un tiempo de 4 s es
    (a) 200 J. (b) 500 J. (c) 800 J. (d) 2,000 J.
18. La potencia requerida para elevar una caja de 100 kg una distancia vertical de 2 m en un tiempo de 4 s es
    (a) 200 W. (b) 500 W. (c) 800 W. (d) 2,000 W.
19. Cuando un automóvil prototipo acelera hasta tres veces su rapidez original, su energía cinética es
    (a) la misma. (c) tres veces mayor.
    (b) el doble. (d) Ninguna de las anteriores.
20. Para levantar una caja de 100 N con un sistema ideal de poleas jalas una soga hacia abajo con 25 N de fuerza. Por cada 1 m de longitud de soga jalada hacia abajo, la caja se eleva
    (a) 25 cm. (b) 25 m. (c) 50 cm. (d) Ninguna de las anteriores.
21. Cuando 100 J se ponen en un dispositivo que pone 40 J de trabajo útil, la eficiencia del dispositivo es
    (a) 40%. (b) 50%. (c) 60%. (d) 140%.
22. Una máquina no puede multiplicar
    (a) fuerzas. (c) energía.
    (b) distancias. (d) Ninguna de las anteriores.
23. Cuando una lata se hace girar en un círculo horizontal, la fuerza neta sobre la lata actúa
    (a) hacia adentro. (c) hacia arriba.
    (b) hacia afuera. (d) Ninguna de las anteriores.
24. Un momento de torsión es una fuerza
    (a) como cualquiera otra fuerza.
    (b) multiplicada por un brazo de palanca.
    (c) que es ficticia.
    (d) que acelera cosas.
25. La inercia rotacional de un objeto es mayor cuando la mayor parte de su masa se ubica
    (a) cerca del eje de rotación. (c) sobre el eje de rotación.
    (b) lejos del eje. (d) fuera del centro.
26. Si el Sol fuera el doble de masivo, su tirón sobre Marte sería
    (a) invariable. (c) de la mitad.
    (b) del doble. (d) cuatro veces mayor.
27. Las mareas oceánicas más altas ocurren cuando la Tierra y la Luna están
    (a) alineadas con el Sol.
    (b) en ángulos rectos con el Sol.
    (c) en cualquier ángulo con el Sol.
    (d) alineadas durante la primavera.
28. La componente de velocidad que puede permanecer constante para una pelota de béisbol lanzada es
    (a) horizontal. (c) Cualquiera de ellas.
    (b) vertical. (d) Ninguna de ellas.
29. La magnitud de la fuerza gravitacional sobre un satélite es constante si la órbita es
    (a) parabólica. (b) circular. (c) elíptica. (d) Todas ellas.
30. Un satélite en la órbita terrestre está arriba de
    (a) la atmósfera terrestre. (c) Ambos.
    (b) el campo gravitacional terrestre. (d) Ninguno.

*Después* de hacer elecciones razonadas, y discutirlas con tus amigos, busca las respuestas en la página S-1.

PARTE DOS

# Propiedades de la materia

Al igual que todos, yo estoy hecho de átomos. Son tan pequeños y numerosos que inhalo miles de millones de billones de átomos con cada bocanada de aire. Exhalo algunos de ellos de inmediato, pero otros átomos permanecen durante algún tiempo y se vuelven parte de mí, muchos de los cuales exhalo después. Otras personas respiran algunos de ellos, de modo que se convierten en parte de mí. Los átomos que constituyen mi cuerpo alguna vez estuvieron en los cuerpos de personas de todas partes del mundo. Más aún, dado que existen más átomos en una bocanada de aire que el número total de seres humanos desde el tiempo cero, en cada bocanada que tú y yo inhalamos, reciclamos átomos que alguna vez fueron parte de cada persona que ha vivido. ¡Oye, en este sentido, todos somos uno!

11

CAPÍTULO 11

# La naturaleza atómica de la materia


11.1 La hipótesis atómica
11.2 Características de los átomos
11.3 Imágenes atómicas
11.4 Estructura atómica
11.5 La tabla periódica de los elementos
11.6 Isótopos
11.7 Compuestos y mezclas
11.8 Moléculas
11.9 Antimateria

1 Representación artística de la punta de un microscopio de sonda de barrido (SPM), que mapea las posiciones relativas de los átomos sobre la superficie de un material. La punta también puede usarse para mover cada átomo como se desee o para dibujar patrones, como los que se necesitan para los circuitos integrados ultrapequeños. 2 El extraordinario físico del siglo XX, Richard P. Feynman. 3 Representación de una molécula de ADN, la materia de la vida. 4 Tucker Hiatt analiza con sus alumnos las propiedades del buckminsterfullereno, o buckybola para abreviar, hecha de 60 átomos de carbono y que se asemeja a la esfera geodésica inventada por Buckminster Fuller.

La mayoría de las personas, cuando se les pregunta quién fue el físico más destacado del siglo XX, es probable que respondan Albert Einstein. Cuando a los físicos se les pregunta quién fue el físico más inquieto y pintoresco del siglo XX, si su respuesta no es Einstein, probablemente será Richard Feynman. Este capítulo trata de los átomos, el tema primordial de la obra y la enseñanza de Feynman que condujo a una mejor comprensión del átomo y a un Premio Nobel de Física para él. Si has leído el libro de Feynman, *Surely You're Joking, Mr. Feynman!* (¿Está usted de broma, Sr. Feynman?), sabrás que, además de su amor por la física, estaba muy interesado en cómo se enseña la física, particularmente en el bachillerato.

Tuve el privilegio de estar en un panel de profesores con Feynman en una reunión de educadores en física en 1987. El panel abordó la cuestión de qué tipo de física debe enseñarse en el bachillerato. Cuando llegué a la escuela donde se realizaba la reunión, vi a Feynman de pie en el salón, solo. Era sabido que, con frecuencia, Feynman estaba solo en tales reuniones, pues los profesores se sentían incómodos en su presencia. ¿De qué hablas con alguien como Feynman? Yo tenía algo de qué hablar porque le habían enviado un ejemplar de mi nueva versión de *Física Conceptual* para bachillerato, y quería conocer sus impresiones sobre la obra. Para mi regocijo, más no para mi sorpresa, lo había leído de principio a fin, a juzgar por las mejoras que me recomendó para la siguiente edición. Como lo deja en claro su libro *Joking*, Feynman "hizo su tarea" antes de sus ponencias. Había leído mi libro y varios otros libros de bachillerato en preparación para este panel que, tristemente, fue su última aparición en público. Todos sabíamos que luchaba contra el cáncer.

En el panel casi me quedé atónito cuando me di cuenta de que él y yo debatíamos no sobre cómo debía enseñarse la física en el bachillerato, sino más bien si debía enseñarse siquiera. A Feynman le gustaban los puntos de vista extremos, y su postura era que la física no debía enseñarse en el bachillerato porque la mayoría de los profesores carecía de pasión por la materia. Esta falta de pasión se transmitiría a los estudiantes, quienes estarían mejor si llegaban a la universidad como una pizarra en blanco. Mi postura era que la física debía enseñarse de manera conceptual, con alguna clase de resolución de problemas como segunda asignatura de física: que los conceptos centrales de la física debían ser familiares para todos los alumnos y que la física, al igual que la matemática, la lengua y la historia, debían constituir el grueso de la educación. Feynman rebatió que un problema importante de mi postura era el número insuficiente de profesores de física capacitados. ¿De dónde provendrían? Mi respuesta fue que, si la clase se hacía muy agradable, a más del porcentaje actual de estudiantes les gustaría la física, luego se especializarían en ella y en 10 años tendrían la categoría de los profesores que se necesitaban.

Unos 10 años después, en una reunión de física en Las Vegas, un joven me detuvo en el salón para decirme cómo mi libro lo había motivado a especializarse en física y luego convertirse en profesor de física. También expresó una pasión por la física. Pensé: "¿Escuchaste eso, Richard?" Porque era cierto, la orientación conceptual de la física ayudó a aumentar las filas de nuevos profesores de física. Mi lema desde entonces ha sido que, si la primera clase de física de un alumno es sensacional, entonces el rigor de un segundo curso será bien recibido.

## 11.1 La hipótesis atómica

La idea de que la materia está compuesta de átomos se remonta a los griegos del siglo V a. C. Los investigadores de la naturaleza de ese entonces se preguntaban si la materia era continua o no. Es posible romper una roca en guijarros, y los guijarros en grava fina. La grava puede romperse en arena fina, que luego puede reducirse a polvo. Para los griegos del siglo V había un trozo de roca muy pequeño, un "átomo", que ya no podía dividirse más.

Aristóteles, el más famoso de los primeros filósofos griegos, no estuvo de acuerdo con la idea de los átomos. En el siglo IV a. C., Aristóteles enseñó que toda la materia estaba compuesta de varias combinaciones de cuatro elementos: tierra, aire, fuego y agua. Esta visión parecía razonable porque, en el mundo circundante, la materia se ve sólo en cuatro formas: sólidos (tierra), gases (aire), líquidos (agua) y el estado de flamas (fuego). Los griegos consideraban al fuego como el elemento de cambio, pues observaban que el fuego producía cambios en las sustancias que quemaba. Las ideas de Aristóteles acerca de la naturaleza de la materia persistieron durante más de 2,000 años.

La idea atómica fue revivida a principios del siglo XIX, por un meteorólogo y profesor inglés, John Dalton. Él logró explicar la naturaleza de las reacciones químicas

**pti**

- Si, en algún cataclismo, todo el conocimiento científico se destruyera y sólo una frase pudiera transmitirse a la siguiente generación de criaturas, Richard Feynman eligió ésta: "Todas las cosas están hechas de átomos, pequeñas partículas que se mueven con movimiento perpetuo, se atraen mutuamente cuando están un poco separadas, pero se repelen cuando se les presiona unas contra otras". La idea de que la materia está compuesta de átomos es un cimiento central de toda la ciencia.

## LA CAÍDA DE ALICIA

Imagina que habitas el mundo de Alicia en el País de las Maravillas cuando se encoge de tamaño. Imagina que caes de una silla y bajas con movimiento lento hasta el suelo, y mientras caes, te encoges continuamente. Cobras ánimo para recibir el impacto sobre el suelo de madera. A medida que te acercas cada vez más, y te vuelves más y más pequeño, observas que la superficie del suelo no es tan lisa como parecía al principio. Aparecen grandes grietas que son las irregularidades microscópicas que se encuentran en toda madera. Al caer en una de esas grietas con el tamaño de un barranco, de nuevo cobras ánimo para el impacto, sólo para descubrir que el fondo del barranco consiste en muchas otras grietas. Al caer más mientras te vuelves más pequeño, observas que las paredes sólidas vibran y se pliegan. Las superficies que vibran consisten en burbujas nebulosas, principalmente esféricas, algunas con forma de huevo, algunas más grandes que otras, y todas escurriendo unas hacia otras, para formar largas cadenas de complicadas estructuras. Al caer todavía más, cobras ánimo para el impacto a medida que te aproximas a una de estas esferas nebulosas, cada vez más cerca, cada vez más pequeño, y... ¡hala! Entras en lo que parece ser un nuevo universo. Caes en un mar de vacío, ocupado por partículas ocasionales que pasan girando a rapideces increíblemente altas. Estás en un *átomo*, tan vacío de materia como el sistema solar. El suelo sólido hacia el que caíste es, excepto por las partículas de materia aquí y allá, principalmente espacio vacío. Entraste al mundo del átomo.

**FIGURA 11.1**
Un modelo del átomo de principios el siglo XX, con un núcleo central y electrones en órbita, muy parecido a un sistema solar con planetas en órbita.

**SCREENCAST: Átomos**

al proponer que toda la materia estaba hecha de **átomos**. Sin embargo, él y otros de la época no tenían evidencia directa de su existencia. Entonces, en 1827, un botánico escocés llamado Robert Brown observó algo muy raro en su microscopio. Mientras estudiaba granos de polen suspendidos en agua, vio que los granos se movían continuamente y saltaban. Al principio pensó que los granos eran algún tipo de formas de vida en movimiento, pero más tarde descubrió que las partículas de polvo y los granos de hollín suspendidos en agua se movían de la misma manera. Este zangoloteo perpetuo y azaroso de las partículas pequeñas, ahora llamado **movimiento browniano**, resulta de colisiones entre partículas visibles y átomos invisibles. Los átomos son invisibles porque son muy pequeños. Aunque no podía ver los átomos, Brown podía ver el efecto que tenían sobre las partículas que *sí podía* ver. Es como una pelota de playa supergigante que rebota entre una multitud en un juego de fútbol. Desde un avión que vuela a gran altura, no verías a las personas porque son pequeñas en relación con la enorme pelota, la que sí podrías ver. Los granos de polen que Brown observó se movían porque eran empujados constantemente por los átomos (en realidad, por las combinaciones atómicas conocidas como moléculas) que constituyen el agua que los rodea.

Albert Einstein explicó el movimiento browniano en 1905, el mismo año en que anunció la teoría de la relatividad especial. Hasta la explicación de Einstein, que permitió descubrir las masas de los átomos, muchos físicos prominentes seguían escépticos acerca de la existencia de éstos. Así puedes ver que la realidad del átomo no se estableció firmemente sino hasta principios del siglo XX.

No puedes ver los átomos porque son muy pequeños. Tampoco puedes ver las estrellas más lejanas. Hay mucho que no puedes ver con los ojos. Pero esto no impide que se investiguen tales cosas, de modo que puedan "verse" a través de instrumentos.

**VIDEO: Evidencia de los átomos**

## 11.2 Características de los átomos

**Los átomos son increíblemente pequeños** Un átomo es muchas veces más pequeño que tú, como una estrella promedio es más grande que tú. Una forma bella de decirlo es que estás entre los átomos y las estrellas. Otra forma más de establecer la pequeñez de los átomos es que el diámetro de un átomo es al diámetro de una manzana, lo que el diámetro de una manzana es al diámetro de la Tierra. Así que, para imaginar una manzana llena de átomos, piensa en la Tierra atiborrada de manzanas. Ambas tienen aproximadamente el mismo número.

**Los átomos son numerosos** En un gramo de agua (una pizca) hay alrededor de 100,000,000,000,000,000,000,000 átomos. En notación científica, esto es $10^{23}$ átomos. El número $10^{23}$ es un número enorme, más que el número de gotas de agua en todos los lagos y ríos del mundo. De modo que hay más átomos en una pizca de agua que gotas de agua en los lagos y ríos del mundo. En la atmósfera hay alrededor de $10^{23}$ átomos en un litro de aire. Es muy interesante que el volumen de la atmósfera

contenga alrededor de $10^{23}$ litros de aire. Éste es un número increíblemente grande de átomos, y el mismo número increíblemente grande de litros de atmósfera. Los átomos son tan pequeños y tan numerosos que hay más o menos tantos átomos en el aire de tus pulmones en cualquier momento que bocanadas de aire en la atmósfera de la Tierra.

**Los átomos tienen movimiento perpetuo** En los sólidos, los átomos vibran en su lugar; en los líquidos, migran de una posición a otra, y en los gases, el rango de migración es incluso mayor. Las gotas de colorante en un vaso de agua, por ejemplo, pronto se dispersan para colorear todo el vaso de agua. Lo mismo sucedería con un vaso lleno de colorante lanzado al océano: se dispersaría y con el tiempo se encontraría en cada parte de los océanos del mundo.

Los átomos y las moléculas de la atmósfera pasan con rapideces de hasta 10 veces la rapidez del sonido. Se dispersan rápidamente, de modo que algunas de las moléculas de oxígeno que respiras tal vez estuvieron a medio país de distancia hace algunos días. Si se analiza un poco más la Figura 11.2, se ve que tus bocanadas de aire exhaladas muy pronto se mezclan con otros átomos en la atmósfera. Después de los pocos años que tarda tu respiración en mezclarse de manera uniforme en la atmósfera, cualquier persona, en cualquier lugar de la Tierra, que inhale una bocanada de aire ingerirá, en promedio, uno de los átomos que se encontraban en tu bocanada exhalada. Pero tu exhalas muchas, muchas bocanadas, de modo que otras personas respiran muchos, muchos átomos que alguna vez estuvieron en tus pulmones, que alguna vez fueron parte de ti, y, desde luego, viceversa. Lo creas o no, con cada bocanada que inhalas, ¡respiras átomos que alguna vez fueron parte de todas las personas que han vivido! Si consideras que los átomos que exhalas fueron parte de tu cuerpo (el olfato de un perro no tendría problemas para distinguirlo), puede decirse con seguridad que literalmente nos respiramos unos a otros.

**Los átomos son intemporales** Muchos átomos de tu cuerpo son casi tan viejos como el mismísimo Universo. Cuando respiras, por ejemplo, sólo algunos de los átomos que inhalas se exhalan en tu siguiente respiración. Los átomos restantes se incorporan en tu cuerpo para volverse parte de ti, y después dejan tu cuerpo por varios medios. Tú no "posees" los átomos que constituyen tu cuerpo; los pides prestados. Todos comparten del mismo acervo de átomos, porque los átomos migran por siempre alrededor, en el interior de las personas y entre ellas. Los átomos circulan de persona a persona mientras respiran y mientras se vaporiza el sudor. Las personas reciclan átomos a gran escala.

El origen de los átomos más ligeros se remonta al origen del Universo, y los átomos más pesados son más viejos que el Sol y la Tierra. Hay átomos en tu cuerpo que han existido desde los primeros momentos del tiempo, y se reciclan por todo el Universo entre innumerables formas, tanto no vivas como vivas. Tú eres el actual cuidador de los átomos de tu cuerpo. Habrá muchos que vendrán después.

**pti**

- ¿Cuánto tardarías en contar hasta 1 millón? Si cada conteo tarda 1 segundo, contar sin parar hasta un millón te tomaría 11.6 días. Para contar hasta mil millones ($10^9$) tardarías 31.7 años. Para contar hasta un billón ($10^{12}$) tardarías 31,700 años. ¡Contar hasta $10^{23}$ te tomaría más de 10,000 veces la edad del Universo!

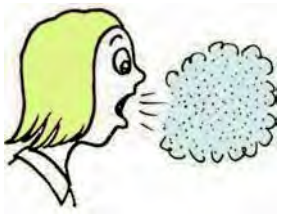


**FIGURA 11.2**
Existen tantos átomos en una bocanada normal de aire como bocanadas de aire hay en la atmósfera de la Tierra.

**VIDEO: Los átomos son reciclables**

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Cuáles son más viejos: los átomos del cuerpo de un anciano o los del cuerpo de un bebé?**
2. **La población mundial crece cada año. ¿Esto significa que la masa de la Tierra aumenta cada año?**
3. **¿Realmente existen átomos que alguna vez fueron parte de Albert Einstein incorporados en los cerebros de todos los miembros de tu familia?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La edad de los átomos en los dos es la misma. La mayoría de los átomos fueron fabricados en estrellas que explotaron antes de que existiera el sistema solar.

La vida no se mide por el número de respiraciones que realizamos, sino por los momentos que nos roban el aliento.—*George Carlin*

2. El mayor número de personas aumenta la masa de la Tierra en cero. Los átomos que constituyen nuestros cuerpos son los mismos átomos que estuvieron aquí antes de que naciéramos: no somos más que polvo y al polvo regresaremos. Los materiales que constituyen las células humanas son reordenamientos de material ya presente. Los átomos que constituyen un bebé que se forma en el útero de su madre son suministrados por los alimentos que come la madre. Y dichos átomos se originaron en las estrellas, algunas de ellas en galaxias muy lejanas. (Es interesante que la masa de la Tierra *sí* aumenta por la incidencia de aproximadamente 40,000 toneladas de polvo interplanetario cada año, pero no por el nacimiento y la supervivencia de más personas.)
3. Muy cierto, y también de Barack Obama. Sin embargo, dichos átomos se combinan de forma diferente a como estaban antes. Si experimentas uno de esos días en los que sientes que no importas mucho, reconfórtate con el pensamiento de que muchos de los átomos que ahora constituyen tu cuerpo vivirán por siempre en los cuerpos de todas las personas sobre la Tierra que todavía no nacen. Tus átomos son inmortales.

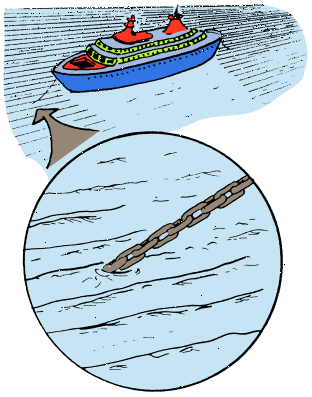


**FIGURA 11.3**
Las ondas que pasan revelan información del barco, porque la distancia entre las crestas de las ondas es pequeña comparada con el tamaño del barco. Las ondas que pasan no revelan nada acerca de la cadena.

**FIGURA 11.4**
Las cadenas de puntos son cadenas de átomos de torio visualizados con un microscopio electrónico de barrido. Esta fotografía histórica de átomos individuales fue tomada en 1970 por investigadores del Instituto Enrico Fermi de la Universidad de Chicago.

## 11.3 Imágenes atómicas

Los átomos son muy pequeños para verse con luz visible. Debido a la difracción, puedes discernir detalles no menores que la longitud de onda de la luz que usas para mirar. Esto se puede entender mediante una analogía con las olas. Un barco es mucho más grande que las olas que pasan junto a él. Como muestra la Figura 11.3, las ondas acuáticas pueden revelar características del barco. Las ondas se *difractan* cuando pasan por el barco. Pero la difracción es nula cuando pasan por la cadena del ancla, lo que revela poco o nada acerca de ella. De igual modo, las ondas de luz visible son muy burdas comparadas con el tamaño de un átomo para mostrar detalles del tamaño y la forma atómicos.

Sin embargo, en la Figura 11.4 se ve una fotografía de átomos: la histórica imagen de 1970 de cadenas de átomos de torio individuales. En realidad la imagen es una micrografía electrónica tomada con un pequeño haz de electrones en un microscopio electrónico de barrido (MEB, o SEM por sus siglas en inglés), desarrollado por Albert Crewe en el Instituto Enrico Fermi de la Universidad de Chicago. Un haz de electrones, como el que proyecta una imagen sobre la pantalla de uno de los primeros televisores, es un chorro de partículas que tienen propiedades ondulatorias. La longitud de onda de un haz de electrones es menor que las longitudes de onda de la luz visible, y los átomos son más grandes que las pequeñas longitudes de onda de un haz de electrones. La micrografía electrónica de Crewe es la primera imagen de alta resolución de átomos individuales.

A mediados de la década de 1980, los investigadores crearon un nuevo tipo de microscopio: el microscopio de efecto túnel (MET, o STM por sus siglas en inglés). Este microscopio emplea una punta aguda que barre una superficie a una distancia de algunos diámetros atómicos punto por punto y línea por línea. En cada punto, una pequeña corriente eléctrica, llamada corriente de tunelización, se mide entre la punta y la superficie. Las variaciones de corriente revelan la topología de la superficie. La imagen de la Figura 11.5 muestra de una manera muy bella la posición de un anillo de átomos. Las ondulaciones que se muestran en el anillo revelan la naturaleza ondulatoria de la

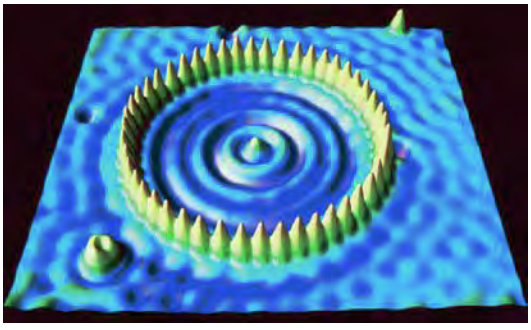


**FIGURA 11.5**
Imagen de 48 átomos de hierro colocados en un anillo circular que "acorralan" electrones sobre una superficie de cristal de cobre, tomada con un microscopio de efecto túnel en el Almaden Laboratory de IBM en San José, California.

**FIGURA 11.6**
Un modelo simplificado del átomo consiste en un núcleo diminuto rodeado de electrones que orbitan en capas. A medida que las cargas de los núcleos aumentan, los electrones se acercan más y las capas se hacen más pequeñas.

materia. Esta imagen, entre muchas otras, resalta la encantadora influencia recíproca entre arte y ciencia.

Dado que no es posible ver el interior de un átomo, se construyen modelos. Un modelo es una abstracción que ayuda a visualizar lo que no se puede ver y, más importante, permite realizar predicciones acerca de las porciones no vistas del mundo natural. Uno de los primeros modelos del átomo (y el más familiar para el público en general) se parece al del sistema solar. Al igual que con el sistema solar, la mayor parte del volumen de un átomo es espacio vacío. En el centro hay un diminuto núcleo muy denso donde se concentra la mayor parte de la masa. Alrededor del núcleo hay "capas" de partículas en órbita. Son **electrones**, unidades básicas de la materia con carga eléctrica (los mismos electrones que constituyen la corriente eléctrica en tu iPhone). Aunque los electrones repelen eléctricamente a otros electrones, son atraídos eléctricamente hacia el núcleo, que tiene carga positiva. A medida que aumentan el tamaño y la carga de los núcleos, los electrones se acercan más, y las capas se vuelven más pequeñas. Es muy interesante que el átomo de uranio, con sus 92 electrones, no sea considerablemente más grande en diámetro que el átomo más ligero, el hidrógeno.

Este modelo se propuso por primera vez a principios del siglo XX, y refleja una comprensión más bien simplificada del átomo. Pronto se descubrió, por ejemplo, que los electrones no orbitan el centro del átomo como los planetas orbitan el Sol. Sin embargo, al igual que la mayor parte de los primeros modelos, el modelo atómico planetario sirvió de valioso escalón para una mejor comprensión y la elaboración de modelos más exactos. Cualquier modelo atómico, sin importar cuán perfeccionado, no es más que una representación simbólica del átomo, no una imagen física del átomo real.

A veces un modelo es útil aun cuando sea incorrecto. El escocés James Watt construyó una máquina de vapor funcional en el siglo XVIII, con base en un modelo de calor que resultó ser bastante incorrecto.

Artistas y científicos buscan patrones en la naturaleza y descubren conexiones que siempre han estado ahí... aunque se han escapado a la mirada.

## 11.4 Estructura atómica

Casi toda la masa de un átomo está concentrada en el **núcleo atómico**, que ocupa sólo algunas cuatrillonésimas de su volumen. Por tanto, el núcleo es extremadamente denso. Si núcleos atómicos brutos pudieran empacarse unos contra otros en una bola de 1 cm de diámetro (aproximadamente el tamaño de un gran guisante), ¡la bola pesaría alrededor de 100,000,000 de toneladas! Enormes fuerzas eléctricas de repulsión impiden tal apretado empaquetado de núcleos atómicos porque cada núcleo está cargado eléctricamente y repele a todos los demás núcleos. Sólo bajo circunstancias especiales los núcleos de dos o más átomos se apiñan en contacto. Esto puede suceder cuando los núcleos en un laboratorio se proyectan hacia un blanco o cuando la materia se calienta a millones de grados. Una reacción nuclear ocasionada por altas temperaturas se denomina *reacción de fusión termonuclear*. Ocurre en los centros de las estrellas y a final de cuentas es lo que las hace brillar. (En el Capítulo 34 estudiarás estas reacciones nucleares.)

El principal bloque de construcción del núcleo es el *nucleón,* que a su vez está compuesto de partículas fundamentales llamadas *quarks*. Cuando un nucleón está en un estado eléctricamente neutro, es un **neutrón**; cuando está en un estado con carga positiva, es un **protón**. Todos los protones son idénticos; son copias unos de otros. Lo

mismo ocurre con los neutrones: cada neutrón es como cualquier otro neutrón. Los núcleos más ligeros tienen aproximadamente iguales números de protones y neutrones; los núcleos más masivos tienen más neutrones que protones. Los protones tienen carga eléctrica positiva que repele otras cargas positivas, pero atrae cargas negativas. De modo que cargas iguales se repelen entre sí, y cargas distintas se atraen entre sí. Los protones positivos en el núcleo son los que atraen la nube circundante de electrones con carga negativa para constituir un átomo. (En el Capítulo 33 se describe la fuerza nuclear fuerte, que enlaza los protones con los neutrones y entre sí en el interior del núcleo.)

## Los elementos

Cuando una sustancia está compuesta sólo de un tipo de átomo se le llama **elemento**. Los átomos son las partículas individuales que constituyen una sustancia. Aunque las palabras *elemento* y *átomo* con frecuencia se utilizan en un contexto similar, la diferencia es que los elementos están hechos de átomos y no de la manera contraria. Un anillo de oro puro de 24 quilates, por ejemplo, está compuesto sólo de átomos de oro. Un anillo de oro con menos quilates está compuesto de oro y otros elementos, como níquel. El líquido plateado de un barómetro o termómetro es el elemento mercurio. Todo el líquido consiste sólo en átomos de mercurio. Un átomo de un elemento particular es la muestra más pequeña de dicho elemento. En consecuencia, puedes ver que, aunque las palabras *átomo* y *elemento* con frecuencia se usan de manera indistinta, *elemento* se refiere a un tipo de sustancia (una que contiene sólo un tipo de átomo), en tanto que *átomo* se refiere a las partículas individuales que constituyen dicha sustancia. Por ejemplo, se habla de aislar un *átomo* de mercurio de un matraz del *elemento* mercurio.

**pti**

- Todas las palabras del idioma castellano se construyen con una combinación de las mismas 27 letras. De igual modo, todas las cosas materiales del mundo están compuestas de diferentes combinaciones de unos 100 elementos diferentes.

En todo el Universo, el hidrógeno es el elemento más ligero y abundante: más de 90% de los átomos son átomos de hidrógeno. El helio, el segundo elemento más ligero, proporciona la mayoría de los átomos restantes del Universo. Los átomos más pesados de tu alrededor fueron fabricados por la fusión de elementos ligeros en los calientes calderos de alta presión de las profundidades del interior de las estrellas. Los elementos más pesados se forman cuando estrellas enormes implosionan y luego explotan: supernovas. Casi todos los elementos sobre la Tierra son remanentes de estrellas que explotaron mucho antes de que naciera el sistema solar.

A la fecha se han identificado más de 115 elementos. De ellos, alrededor de 90 se dan en la naturaleza. Los demás se producen en el laboratorio con aceleradores atómicos de alta energía y reactores nucleares. Los elementos producidos en el laboratorio son demasiado inestables (radiactivos) para darse de manera natural en cantidades considerables. De una despensa que contiene menos de 100 elementos, se tienen los átomos que constituyen casi toda sustancia simple, compleja, viva y no viva del Universo conocido. Más de 99% del material sobre la Tierra está formado sólo de aproximadamente una docena de los elementos. Los demás elementos son relativamente raros. Los seres humanos, por ejemplo, están compuestos principalmente de cinco elementos: oxígeno (O), carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y calcio (Ca). Las letras entre paréntesis son los símbolos químicos de dichos elementos.

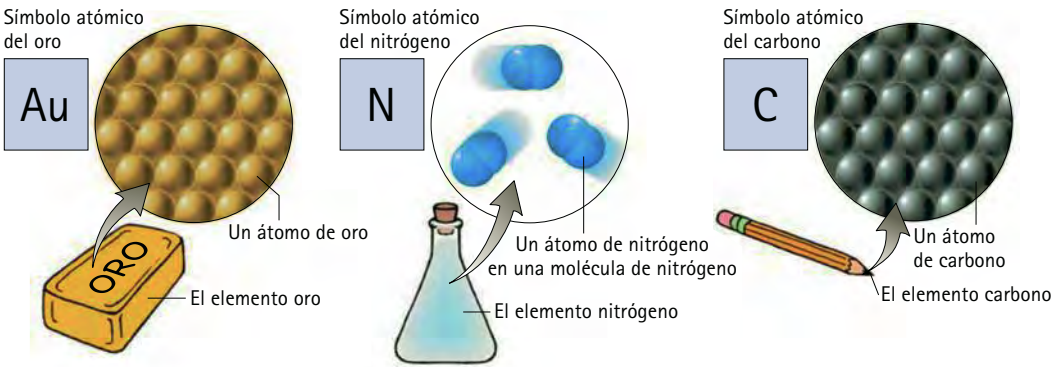



**FIGURA 11.7**
Cualquier elemento consiste sólo en un tipo de átomo. El oro consta sólo de átomos de oro, un matraz de nitrógeno gaseoso consiste sólo en átomos de nitrógeno, y el carbono de un lápiz de grafito está compuesto sólo de átomos de carbono.

## 11.5 La tabla periódica de los elementos

Los elementos se clasifican por el número de protones de su núcleo, es decir, su **número atómico**. El hidrógeno, que contiene un protón por átomo, tiene número atómico 1; el helio, con dos protones por átomo, tiene número atómico 2; y así sucesivamente hasta el elemento más pesado que ocurre en la naturaleza, el uranio, con número atómico 92. Los números continúan después del número atómico 92, con los elementos transuránicos (más allá del uranio) producidos artificialmente. El ordenamiento de los elementos por sus números atómicos constituye la **tabla periódica de los elementos** (Figura 11.9).

La tabla periódica es una tabla que enlista los átomos por su número atómico y también por sus arreglos eléctricos. Se parece mucho a un calendario con sus semanas en filas y sus días en columnas. De izquierda a derecha, cada elemento tiene átomos con un protón y un electrón más que el elemento que le precede. Al leer hacia abajo la tabla, cada elemento tiene átomos con una capa más que el de arriba. Las capas interiores están llenas hasta su capacidad, y la capa exterior puede o no estarlo, dependiendo del elemento. Sólo los elementos de la extrema derecha de la tabla, donde estaría el sábado en un calendario, tienen sus capas exteriores llenas hasta su capacidad. Se trata de los *gases nobles*: helio, neón, argón, criptón, xenón y radón. La tabla periódica es el mapa de caminos del químico, y mucho más. La mayoría de los científicos considera la tabla periódica como la más elegante tabla de organización jamás ideada. El enorme esfuerzo humano y la ingenuidad que se utilizaron para descubrir sus regularidades constituyen una fascinante historia de detectives atómicos.[1]

Los elementos pueden tener hasta siete capas, y cada capa puede contener un número máximo de electrones. La primera capa, y la más interna, tiene una capacidad para dos electrones y la segunda capa tiene una capacidad para ocho electrones. El arreglo de los electrones en las capas dicta propiedades como las temperaturas de fusión y de congelación, la conductividad eléctrica y el sabor, textura, apariencia y color de las sustancias. Los arreglos de los electrones literalmente brindan vida y color al mundo.

Los modelos del átomo evolucionaron con los nuevos descubrimientos. El antiguo modelo orbital del átomo dio lugar a un modelo que ve al electrón como una onda estacionaria, completamente diferente de la idea de una partícula en órbita. Éste es el modelo mecánico cuántico, introducido en la década de 1920, que es una teoría del mundo a pequeña escala que incluye las pronosticadas propiedades ondulatorias de la materia. Trata con "conglomerados" que ocurren en el nivel subatómico: conglomerados de materia o conglomerados de cosas como energía y cantidad de movimiento angular. (En el Capítulo 31 se habla más acerca del cuanto.)

### Tamaños relativos de los átomos

Los diámetros de las capas electrónicas de los átomos están determinados por la cantidad de carga eléctrica del núcleo. Por ejemplo, el protón positivo del átomo de hidrógeno contiene un electrón en una órbita a cierto radio. Si se duplica la carga positiva del núcleo, el electrón en órbita será jalado hacia una órbita más apretada con la mitad de su radio anterior, dado que la atracción eléctrica se duplica. Esto ocurre con el helio, que tiene un núcleo doblemente cargado cuando atrae un solo electrón. Es interesante que si se agrega un segundo electrón no sea jalado tanto porque el primer electrón compensa en parte la atracción del núcleo doblemente cargado. Éste es un átomo de helio neutro, que es un poco más pequeño que un átomo de hidrógeno.

Un átomo con carga eléctrica desequilibrada (por ejemplo, un núcleo con más carga positiva que las cargas negativas circundantes) se le denomina **ión**. Un ión es un átomo cargado. Un átomo de helio que contiene sólo un electrón, por ejemplo,

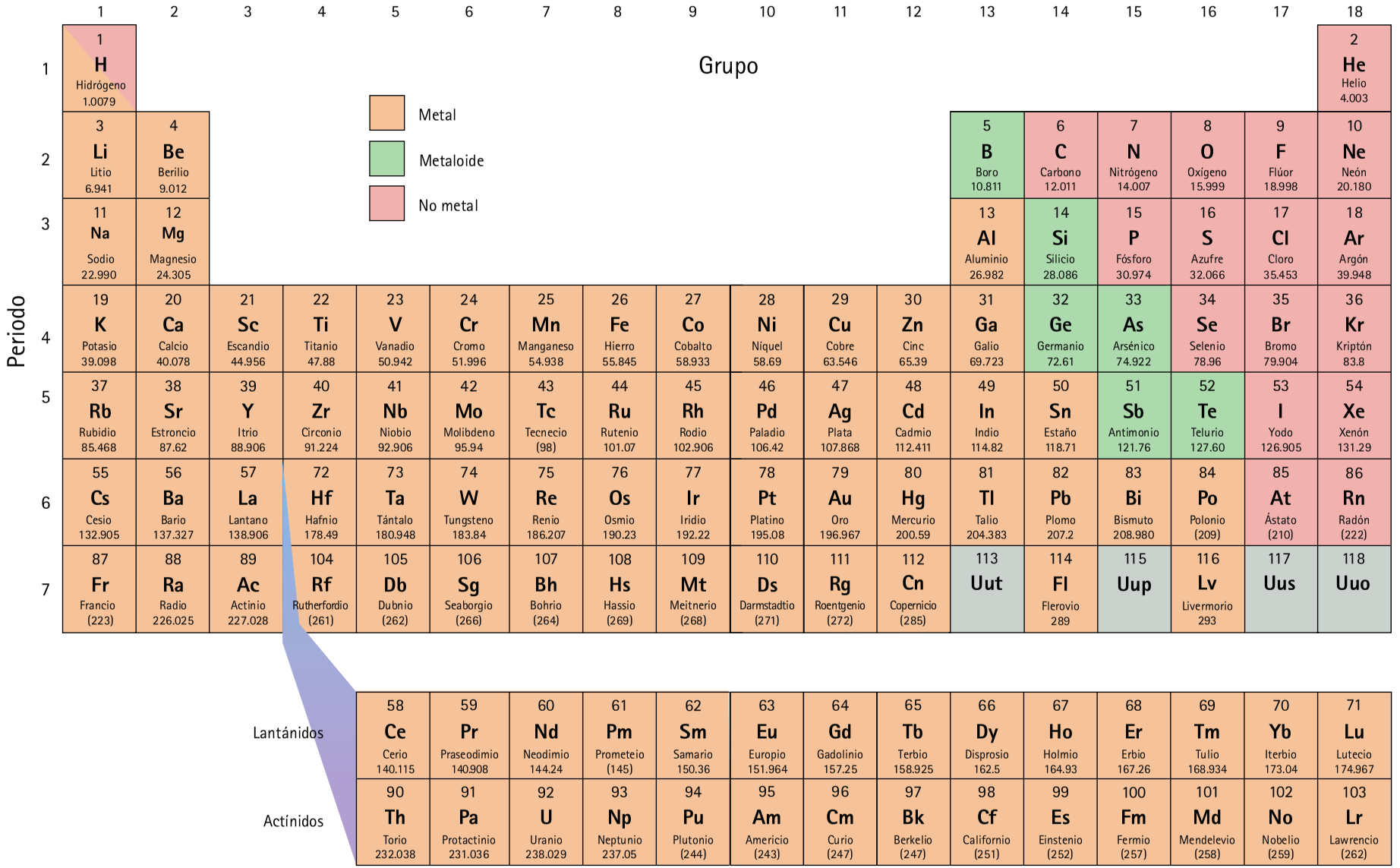
**pti**

- El mercurio, el elemento número 80, suele encontrarse en rocas y minerales como el cinabrio y los combustibles fósiles. El mercurio en sí, sin perturbación, no es dañino. Pero cuando se machaca el mineral o se quema carbón, se libera mercurio al aire, donde puede flotar a lo largo de cientos de kilómetros y depositarse en los árboles y la tierra o en las corrientes acuáticas, lagos y océanos. Ahí es donde el mercurio se vuelve peligroso. Cuando se combina con carbono se convierte en metilmercurio, una neurotoxina mortal. Cada año, alrededor de 75 toneladas de mercurio están en el carbón que se suministra a las plantas eléctricas estadounidenses y alrededor de $\frac{2}{3}$ de éste se emite al aire. China se unió a esta práctica.

La mayoría de los elementos de la tabla periódica se encuentran en los gases interestelares.

**FIGURA 11.8**
Tanto tú como Leslie están hechos de polvo de estrellas, en el sentido de que el carbono, el oxígeno, el nitrógeno y los demás átomos que constituyen tu cuerpo se originaron en las profundidades de antiguas estrellas que explotaron hace mucho tiempo.

[1]La tabla periódica se atribuye al químico ruso profesor Dmitri Mendeléyev (1834-1907), quien, de forma más importante, utilizó la tabla para predecir la existencia de elementos no conocidos en ese entonces. Mendeléyev fue un profesor muy querido y dedicado cuyos salones de clase estaban llenos de estudiantes que querían escucharlo. Fue tanto un gran profesor como un gran científico. El elemento 101 se nombró en su honor.




| Grupo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 H Hidrógeno 1.0079 | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 He Helio 4.003 |
| 2 | 3 Li Litio 6.941 | 4 Be Berilio 9.012 | | | | | | | | | | | 5 B Boro 10.811 | 6 C Carbono 12.011 | 7 N Nitrógeno 14.007 | 8 O Oxígeno 15.999 | 9 F Flúor 18.998 | 10 Ne Neón 20.180 |
| 3 | 11 Na Sodio 22.990 | 12 Mg Magnesio 24.305 | | | | | | | | | | | 13 Al Aluminio 26.982 | 14 Si Silicio 28.086 | 15 P Fósforo 30.974 | 16 S Azufre 32.066 | 17 Cl Cloro 35.453 | 18 Ar Argón 39.948 |
| 4 | 19 K Potasio 39.098 | 20 Ca Calcio 40.078 | 21 Sc Escandio 44.956 | 22 Ti Titanio 47.88 | 23 V Vanadio 50.942 | 24 Cr Cromo 51.996 | 25 Mn Manganeso 54.938 | 26 Fe Hierro 55.845 | 27 Co Cobalto 58.933 | 28 Ni Níquel 58.69 | 29 Cu Cobre 63.546 | 30 Zn Cinc 65.39 | 31 Ga Galio 69.723 | 32 Ge Germanio 72.61 | 33 As Arsénico 74.922 | 34 Se Selenio 78.96 | 35 Br Bromo 79.904 | 36 Kr Kriptón 83.8 |
| 5 | 37 Rb Rubidio 85.468 | 38 Sr Estroncio 87.62 | 39 Y Itrio 88.906 | 40 Zr Circonio 91.224 | 41 Nb Niobio 92.906 | 42 Mo Molibdeno 95.94 | 43 Tc Tecnecio (98) | 44 Ru Rutenio 101.07 | 45 Rh Rodio 102.906 | 46 Pd Paladio 106.42 | 47 Ag Plata 107.868 | 48 Cd Cadmio 112.411 | 49 In Indio 114.82 | 50 Sn Estaño 118.71 | 51 Sb Antimonio 121.76 | 52 Te Telurio 127.60 | 53 I Yodo 126.905 | 54 Xe Xenón 131.29 |
| 6 | 55 Cs Cesio 132.905 | 56 Ba Bario 137.327 | 57 La Lantano 138.906 | 72 Hf Hafnio 178.49 | 73 Ta Tántalo 180.948 | 74 W Tungsteno 183.84 | 75 Re Renio 186.207 | 76 Os Osmio 190.23 | 77 Ir Iridio 192.22 | 78 Pt Platino 195.08 | 79 Au Oro 196.967 | 80 Hg Mercurio 200.59 | 81 Tl Talio 204.383 | 82 Pb Plomo 207.2 | 83 Bi Bismuto 208.980 | 84 Po Polonio (209) | 85 At Ástato (210) | 86 Rn Radón (222) |
| 7 | 87 Fr Francio (223) | 88 Ra Radio 226.025 | 89 Ac Actinio 227.028 | 104 Rf Rutherfordio (261) | 105 Db Dubnio (262) | 106 Sg Seaborgio (266) | 107 Bh Bohrio (264) | 108 Hs Hassio (269) | 109 Mt Meitnerio (268) | 110 Ds Darmstadtio (271) | 111 Rg Roentgenio (272) | 112 Cn Copernicio (285) | 113 Uut | 114 Fl Flerovio 289 | 115 Uup | 116 Lv Livermorio 293 | 117 Uus | 118 Uuo |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Lantánidos | 58 Ce Cerio 140.115 | 59 Pr Praseodimio 140.908 | 60 Nd Neodimio 144.24 | 61 Pm Prometeio (145) | 62 Sm Samario 150.36 | 63 Eu Europio 151.964 | 64 Gd Gadolinio 157.25 | 65 Tb Terbio 158.925 | 66 Dy Disprosio 162.5 | 67 Ho Holmio 164.93 | 68 Er Erbio 167.26 | 69 Tm Tulio 168.934 | 70 Yb Iterbio 173.04 | 71 Lu Lutecio 174.967 |
| Actínidos | 90 Th Torio 232.038 | 91 Pa Protactinio 231.036 | 92 U Uranio 238.029 | 93 Np Neptunio 237.05 | 94 Pu Plutonio (244) | 95 Am Americio (243) | 96 Cm Curio (247) | 97 Bk Berkelio (247) | 98 Cf Californio (251) | 99 Es Einstenio (252) | 100 Fm Fermio (257) | 101 Md Mendelevio (258) | 102 No Nobelio (259) | 103 Lr Lawrencio (262) |

**FIGURA 11.9**
La tabla periódica de los elementos. El número que está arriba del símbolo químico es el *número atómico*, y el número que está abajo es la *masa atómica* promediada por abundancia isotópica en la superficie de la Tierra y expresada en unidades de masa atómica (uma). Las masas atómicas de los elementos radiactivos que se muestran entre paréntesis son los números enteros más cercanos al isótopo más estable de dicho elemento.

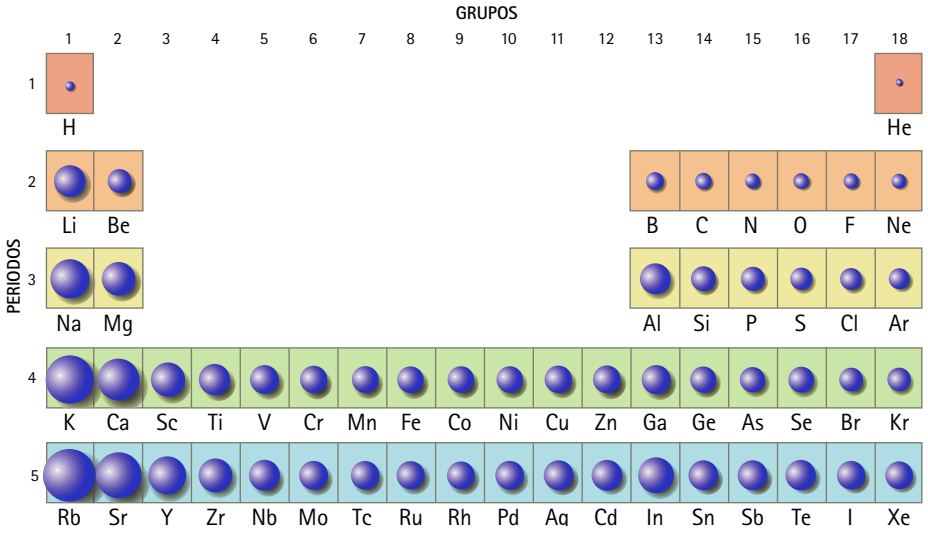



**FIGURA 11.10**
Los tamaños de los átomos disminuyen gradualmente de izquierda a derecha a través de la tabla periódica (aquí sólo se muestran los primeros cinco periodos).

es un ión helio. Se dice que es un ión positivo porque tiene más carga positiva que carga negativa.

De modo que dos electrones alrededor de un núcleo doblemente cargado adoptan una configuración característica del helio. Dos electrones que rodean un núcleo de helio constituyen un átomo neutro. Un tercer protón en un núcleo atómico puede jalar dos electrones hacia una órbita todavía más cerrada y, más aún, contener un tercer electrón en una órbita un poco más grande. Éste es el átomo de litio, número atómico 3. Puedes continuar con este proceso y aumentar la carga positiva del núcleo y agregar sucesivamente más electrones y más órbitas hasta llegar a números atómicos mayores que 100, a los elementos radiactivos "sintéticos".[2]

A medida que la carga nuclear aumenta y se agregan más electrones en las órbitas exteriores, las órbitas internas se encogen de tamaño debido a la mayor atracción nuclear. Esto significa que los elementos más pesados no son más grandes en diámetro que los elementos más ligeros. El diámetro del átomo de xenón, por ejemplo, sólo tiene aproximadamente cuatro diámetros de helio, aun cuando es casi 33 veces más masivo. Los tamaños relativos de los átomos de la Figura 11.10 están aproximadamente a la misma escala.

**SCREENCAST: Tabla periódica**

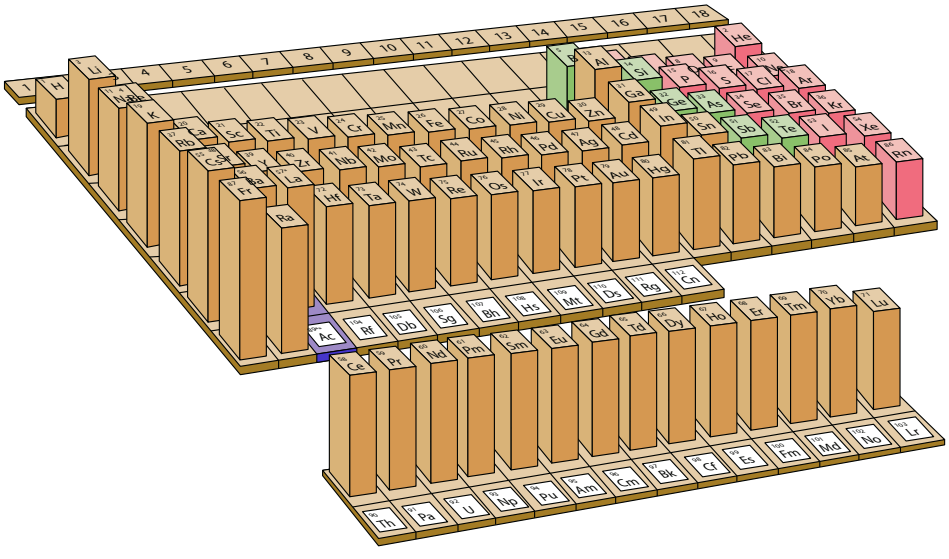


**FIGURA 11.11**
Esta tabla muestra los tamaños atómicos relativos, indicados por altura. Observa que el tamaño atómico generalmente disminuye a medida que te mueves hacia la esquina superior derecha de la tabla periódica.

[2]Cada órbita puede contener sólo algunos electrones. Los números de los primeros cuatro periodos son 2, 8, 8, 18.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Qué fuerza fundamental dicta el tamaño de un átomo?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La fuerza eléctrica.

## 11.6 Isótopos

No confundas un isótopo con un *ión*, que es un átomo que está eléctricamente cargado por un exceso o una deficiencia de electrones.

Mientras que el número de protones de un núcleo coincide exactamente con el número de electrones alrededor del núcleo en un átomo neutro, el número de protones del núcleo no necesariamente coincide con el número de neutrones. Por ejemplo, la mayoría de los núcleos de hierro con 26 protones contiene 30 neutrones, mientras que un pequeño porcentaje contiene 29 neutrones. Los átomos del mismo elemento que tienen diferentes números de neutrones se llaman **isótopos** del elemento. Los átomos neutros de los diversos isótopos de un elemento dado tienen todos el mismo número de electrones y el mismo número de protones. En su mayor parte, se comportan de manera idéntica. (En el Capítulo 33 se regresará a los isótopos.)

No confundas número de masa con masa atómica. El *número de masa* es un entero que especifica un isótopo y no tiene unidades: es simplemente el número de nucleones en un núcleo. La *masa atómica* es un promedio de las masas de los isótopos de un elemento dado, expresada en *unidades de masa atómica* (uma).

Los isótopos se identifican por su *número de masa*, que es el número total de protones y neutrones (en otras palabras, el número de nucleones) en el núcleo. Un isótopo de hidrógeno que tiene un protón y ningún neutrón, por ejemplo, tiene un número de masa de 1 y se le conoce como hidrógeno-1. Del mismo modo, un átomo de hierro con 26 protones y 30 neutrones tiene un número de masa de 56 y se le conoce como hierro-56. Un átomo de hierro con 26 protones y sólo 29 neutrones se designa como hierro-55.

La masa total de un átomo se denomina *masa atómica*. Ésta es la suma de las masas de todos los componentes del átomo (electrones, protones y neutrones). Puesto que los electrones son mucho menos masivos que los protones y neutrones, su aportación a la masa atómica es despreciable. Los átomos son tan pequeños que expresar sus masas en unidades de gramos o kilogramos no es práctico. En vez de ello, los científicos usan una unidad de masa especialmente definida conocida como **unidad de masa atómica** o **uma**. Un nucleón tiene una masa de aproximadamente 1 uma. La uma se define como exactamente 1/12 de la masa de un átomo de carbono-12. La tabla periódica menciona las masas atómicas en unidades de uma.

La mayoría de los elementos tienen varios isótopos. La masa atómica de cada elemento mencionado en la tabla periódica es el promedio ponderado de las masas de dichos isótopos con base en la ocurrencia de cada isótopo sobre la Tierra. Por ejemplo, aunque el isótopo predominante del carbono contiene seis protones y seis neutrones, alrededor de 1% de todos los átomos de carbono contienen siete neutrones. El isótopo más pesado eleva la masa atómica promedio del carbono de 12.000 uma a 12.011 uma.

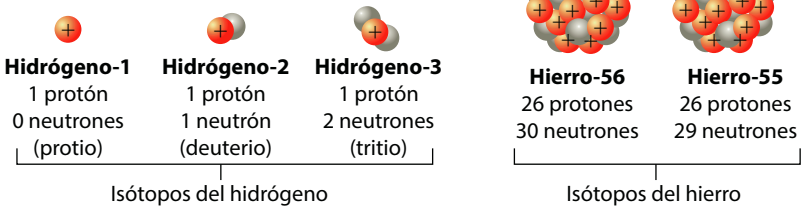



**FIGURA 11.12**
Los isótopos de un elemento tienen el mismo número de protones, pero diferentes números de neutrones y en consecuencia diferentes números de masa. Los tres isótopos del hidrógeno tienen nombres especiales: protio para el hidrógeno-1, deuterio para el hidrógeno-2 y tritio para el hidrógeno-3. De estos tres isótopos, el hidrógeno-1 es el más común. Para la mayoría de los elementos, como el hierro, los isótopos no tienen nombres especiales y se indican simplemente por el número de masa.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Cuáles contribuyen más a la masa de un átomo: los electrones o los protones? ¿Cuáles contribuyen más al volumen de un átomo (su tamaño)?**
2. **¿Cuál se representa mediante un número entero: el número de masa o la masa atómica?**

**3. ¿Los dos isótopos del hierro tienen el mismo *número atómico*? ¿El mismo *número de masa atómica*?**

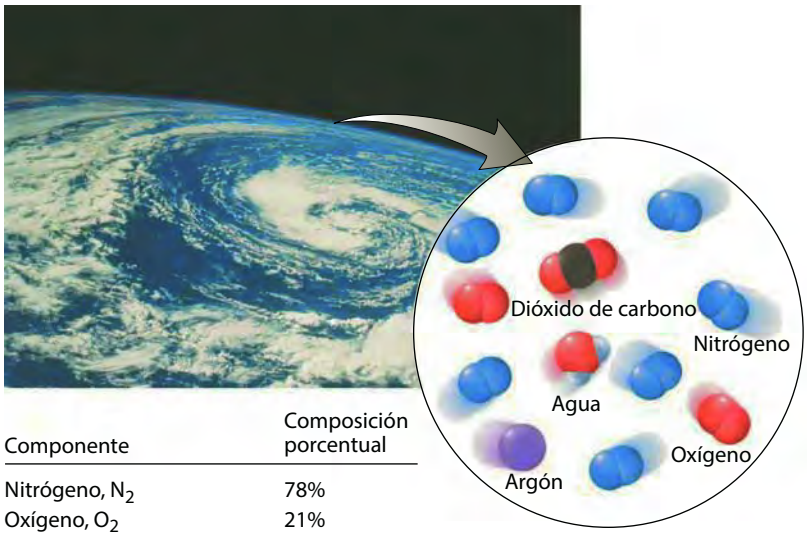
**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Los protones contribuyen más a la masa de un átomo; los electrones contribuyen más a su tamaño.
2. El número de masa siempre está dado como un número entero, como hidrógeno-1 o carbono-12. La masa atómica, por el contrario, es la masa promedio de los varios isótopos de un elemento y, por tanto, se representa con un número fraccional.
3. Los dos isótopos del hierro tienen el mismo número atómico 26, porque cada uno tiene 26 protones en el núcleo. Tienen diferentes números de masa atómica si tienen diferentes números de neutrones en el núcleo.

## 11.7 Compuestos y mezclas

Cuando átomos de diferentes elementos se enlazan entre sí, forman un **compuesto**. Los ejemplos de compuestos simples incluyen agua, amoniaco y metano. Un compuesto es unívocamente diferente a los elementos de los cuales está constituido, y sólo puede separarse en sus elementos constituyentes por medios químicos. El sodio, por ejemplo, es un metal que reacciona violentamente con el agua. El cloro es un gas amarillo-verdoso venenoso. Sin embargo, el compuesto de estos dos elementos es el cristal blanco relativamente inofensivo (NaCl) que espolvoreas en tus papas. Considera también que, a temperaturas ordinarias, los elementos hidrógeno y oxígeno son ambos gases. Cuando se combinan, forman el compuesto agua ($H_2O$), un líquido... bastante diferente.

No todas las sustancias reaccionan químicamente unas con otras cuando se juntan. Una sustancia que se mezcla sin enlace químico se llama **mezcla**. La arena combinada con sal es una mezcla. Los gases hidrógeno y oxígeno forman una mezcla hasta que enciende, con lo que forman el compuesto agua. Una mezcla común de la que todos dependen es la de nitrógeno y oxígeno juntos con un poco de argón y pequeñas cantidades de dióxido de carbono y otros gases. Es el aire que respiras.




| Componente | Composición porcentual |
|---|---|
| Nitrógeno, $N_2$ | 78% |
| Oxígeno, $O_2$ | 21% |
| Argón, Ar | 0.9% |
| Agua, $H_2O$ | 0-4% (variable) |
| Dióxido de carbono, $CO_2$ | 0.034% (variable) |

**FIGURA 11.13**
La atmósfera de la Tierra es una mezcla de elementos y compuestos gaseosos. Aquí se muestran algunos de ellos.

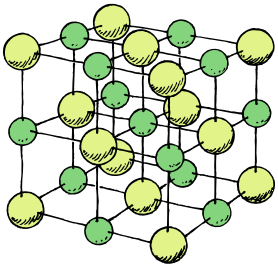


**FIGURA 11.14**
La sal de mesa (NaCl) es un compuesto cristalino que no está hecho de moléculas. Los átomos de sodio (verde) y de cloro (amarillo) forman un cristal.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿La sal de mesa común es un elemento, un compuesto o una mezcla?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La sal no es un elemento; si lo fuera, la verías mencionada en la tabla periódica. La sal de mesa pura es un compuesto de los elementos sodio y cloro, representados en la Figura 11.14. Observa que los átomos de sodio (verde) y los átomos de cloro (amarillo) están ordenados en un patrón tridimensional repetitivo: un cristal. Cada átomo de sodio está rodeado por seis átomos de cloro, y cada átomo de cloro está rodeado por seis átomos de sodio. Es interesante que no haya grupos sodio-cloro independientes que puedan etiquetarse como moléculas.[3]

## 11.8 Moléculas

Una **molécula** es la partícula más pequeña de sustancia que consiste en dos o más átomos que se enlazan mediante compartición de electrones. (Se dice que tales átomos tienen *enlaces covalentes*.) Una molécula puede ser tan simple como la combinación de dos átomos de oxígeno, $O_2$, o la combinación de dos átomos de nitrógeno, $N_2$, que son los elementos que constituyen la mayor parte del aire que respiras. Dos átomos de hidrógeno se combinan con un solo átomo de oxígeno para formar una molécula de agua, $H_2O$. Modificar una molécula con un átomo puede representar una gran diferencia. Si sustituyes el átomo de oxígeno por un átomo de azufre, produces ácido sulfhídrico, $H_2S$, un gas tóxico de olor fuerte.

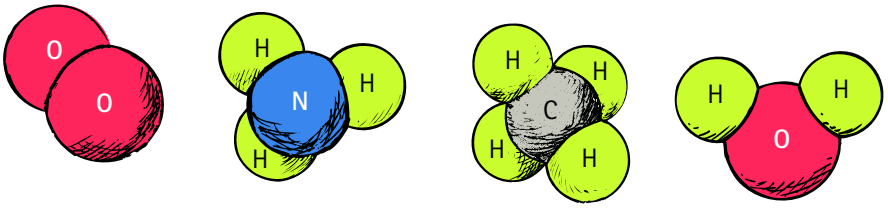



**FIGURA 11.15**
Modelos de moléculas simples: $O_2$, $NH_3$, $CH_4$ y $H_2O$. Los átomos de una molécula no sólo se mezclan, sino que se unen de una manera bien definida.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Cuántos núcleos atómicos hay en un solo átomo de oxígeno? ¿En una sola molécula de oxígeno?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

En un átomo de oxígeno hay un núcleo, O, y dos en la combinación de dos átomos de oxígeno: una molécula de oxígeno, $O_2$.

Aunque el $H_2O$ es el principal gas de efecto invernadero en la atmósfera, el $CO_2$, el segundo gas de efecto invernadero más predominante, es notorio porque su mayor abundancia se atribuye a la actividad humana. Dado que si continúa el calentamiento por $CO_2$ se puede desencadenar más $H_2O$, una preocupación actual es la creciente cantidad de ambos gases en la atmósfera.

Para separar las moléculas se necesita energía. A fin de entender esto puedes pensar en un par de imanes pegados. Así como se necesita cierta "energía muscular" para separar los imanes, el rompimiento de las moléculas necesita energía. Durante la fotosíntesis, las plantas utilizan la energía de la luz solar para romper los enlaces dentro del dióxido de carbono atmosférico y el agua para producir gas oxígeno y moléculas de carbohidratos. Dichas moléculas de carbohidratos retienen esta energía solar hasta que el proceso se invierte: la planta se oxida, ya sea en forma lenta al pudrirse o rápida al

[3]En sentido estricto, la sal de mesa común es una mezcla, a menudo con pequeñas cantidades de yoduro de potasio y azúcar. El yodo del yoduro de potasio virtualmente ha erradicado una enfermedad frecuente de tiempos antiguos, una inflamación de la glándula tiroides conocida como bocio endémico. Pequeñas cantidades de azúcar evitan la oxidación de la sal, que de otro modo se tornaría amarilla.

quemarse. Entonces la energía proveniente de la luz solar se libera de vuelta al ambiente. ¡De modo que el lento calentamiento de la composta en descomposición o el rápido calentamiento de una fogata en realidad es el calentamiento de la luz solar almacenada!

Más cosas pueden quemarse además de las que contienen carbono e hidrógeno. El hierro también se "quema" (se oxida). Eso es lo que es la formación de herrumbre: la lenta combinación de átomos de oxígeno con átomos de hierro, que libera energía. Cuando la oxidación del hierro se acelera, constituye agradables paquetes calentadores de manos para esquiadores y excursionistas invernales. Cualquier proceso en el que los átomos se reordenen para formar diferentes moléculas se llama *reacción química*.

El sentido del olfato humano es sensible a cantidades excesivamente pequeñas de moléculas. Tus órganos olfatorios detectan con facilidad pequeñas concentraciones de gases nocivos como el ácido sulfhídrico (la sustancia que huele como a huevos podridos), el amoniaco y el éter. El olor del perfume es causado por moléculas que se evaporan rápidamente y se difunden de manera aleatoria en el aire hasta que algunas de ellas se acercan lo suficiente a tu nariz para ser inhaladas. Sólo son unas cuantas de las miles de millones de moléculas que, en sus deambulaciones sin dirección, terminan en tu nariz. Puedes tener una idea de la rapidez de la difusión molecular en el aire cuando estás en tu recámara y percibes el olor a comida poco después de que la puerta del horno se abre en la cocina.

La discriminación olfativa del salmón se ha medido en partes por *billón* —bastante increíble—. Cuando llega la época de regresar del océano a su hábitat original, los salmones siguen su olfato. Nadan en una dirección donde las concentraciones de aguas conocidas se vuelven mayores. Con el tiempo encuentran la fuente de esa agua donde pasaron los primeros dos años de sus vidas.

## 11.9 Antimateria

Mientras que la materia está compuesta de átomos con núcleos cargados positivamente y electrones cargados negativamente, la **antimateria** está compuesta de átomos con núcleos negativos y electrones positivos, o *positrones*.

Los positrones se descubrieron por primera vez en 1932, en los rayos cósmicos que bombardean la atmósfera de la Tierra. En la actualidad, antipartículas de todo tipo se producen regularmente en laboratorios con el uso de grandes aceleradores nucleares. Un positrón tiene la misma masa que un electrón y la misma magnitud de carga, pero el signo opuesto. Los antiprotones tienen la misma masa que los protones, pero con carga negativa. El primer antiátomo artificial completo, un positrón que orbitaba un antiprotón, se construyó en 1995. Toda partícula cargada tiene una antipartícula de la misma masa y carga opuesta. Las partículas neutras (como el neutrón) también tienen antipartículas, que son iguales en masa y en algunas otras propiedades, pero opuestas en otras propiedades determinadas. Toda partícula tiene una antipartícula. Incluso existen antiquarks.

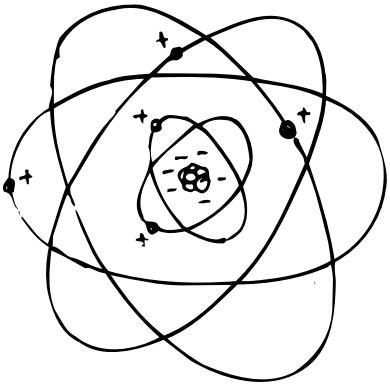


**FIGURA 11.16**
Un átomo de antimateria tiene un núcleo con carga negativa rodeado por positrones.

La fuerza gravitacional no distingue entre materia y antimateria: cada una atrae a la otra. Además, no hay forma de indicar si algo está hecho de materia o de antimateria por la luz que emite. Sólo con efectos nucleares mucho más sutiles y difíciles de medir podría determinarse si una galaxia distante está hecha de materia o de antimateria. Pero, si una antiestrella encontrase una estrella, sería otra historia. Se aniquilarían entre sí, y la mayor parte de la materia se convertiría en energía radiante (esto es lo que ocurrió con el antiátomo creado en 1995, cuando encontró materia normal y rápidamente se aniquiló en una explosión de energía). Este proceso, más que cualquier otro conocido, resulta en la máxima producción de energía por gramo de sustancia: $E = mc^2$, con un 100% de conversión de masa.[4] (La fisión y fusión nucleares, por el contrario, convierten menos de 1% de la materia involucrada.)

Puedo vivir con duda e incertidumbre y no saber. Creo que es mucho más interesante vivir sin saber que tener respuestas que puedan estar equivocadas.—*Richard Feynman*

En el entorno inmediato no puede haber materia y antimateria, al menos no en cantidades apreciables o durante tiempos considerables. Es por eso que algo hecho de antimateria se transformaría por completo en energía radiante en cuanto tocara materia, y consumiría una cantidad igual de materia normal en el proceso. Si la Luna

[4]Algunos físicos especulan que, justo después del Big Bang, el Universo temprano tenía miles de millones de veces más partículas de las que hay ahora, y que una extinción casi total de materia y antimateria causada por su aniquilación recíproca dejó sólo la cantidad relativamente pequeña de materia ahora presente en el Universo.

estuviera hecha de antimateria, por ejemplo, un destello de radiación energética surgiría en cuanto una nave espacial la tocara. Tanto la nave espacial como una cantidad igual de la Luna de antimateria desaparecerían en una explosión de energía radiante. Se sabe que la Luna no es de antimateria porque esto no ocurrió durante las misiones lunares. (En realidad, los astronautas no corrieron este tipo de peligro porque había evidencia que demostraba que la Luna estaba hecha de materia ordinaria.) Pero, ¿qué hay de otras galaxias? Hay fuertes razones para creer que, en la parte de Universo conocido (el "Universo observable"), las galaxias están hechas sólo de materia normal, además de las ocasionales antipartículas transitorias. Pero, ¿qué hay del Universo más allá? ¿O de otros universos? No se sabe.

La ciencia es una manera de enseñar a conocer algo, qué no se conoce, en qué medida se conocen las cosas (porque nada se conoce de manera absoluta), cómo manejar la duda y la incertidumbre, cuáles son las reglas de evidencia, cómo pensar acerca de las cosas de modo que puedan formularse juicios, y cómo distinguir la verdad del fraude y del espectáculo.
—*Richard Feynman*

**PUNTO DE CONTROL**

**Si un cuerpo de antimateria de 1 gramo encuentra un cuerpo de materia de 10 gramos, ¿qué masa sobrevive?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Nueve gramos de materia sobreviven (los otros 2 gramos se transforman en energía radiante).

## Materia oscura

Se sabe que los elementos de la tabla periódica no están confinados al planeta Tierra. A partir de estudios de radiación proveniente de otras partes del Universo, se descubrió que las estrellas y otros objetos "ahí afuera" están compuestos de las mismas partículas que hay en la Tierra. Las estrellas emiten luz con las mismas "huellas digitales" (*espectros atómicos*; véase el Capítulo 30) que los elementos de la tabla periódica. Cuán maravilloso es descubrir que las leyes que gobiernan la materia en la Tierra se extienden a todo el Universo observable. Sin embargo, todavía existe un detalle problemático: las fuerzas gravitacionales dentro de las galaxias se miden como mucho mayores de lo que se puede explicar con la materia visible.

Encontrar la naturaleza de la materia oscura y la naturaleza de la energía del espacio vacío son búsquedas de alta prioridad en estos tiempos. Lo que se aprenderá hacia el 2050 probablemente empequeñecerá todo lo que se ha conocido jamás.

Los astrofísicos hablan de **materia oscura**: materia que no se puede ver y que jala de las estrellas y galaxias que se *pueden* ver. En los últimos años del siglo XX, los astrofísicos confirmaron que alrededor de 23% de la materia en el Universo está compuesta de la materia oscura nunca vista. Cualquier cosa que sea la materia oscura, la mayor parte o toda ella es probable que sea materia "exótica", muy diferente de los elementos que constituyen la tabla periódica y diferente de cualquier extensión de la lista actual de elementos. Gran parte del resto del Universo es *energía oscura*, que empuja hacia afuera sobre el Universo en expansión. Tanto la materia oscura como la energía oscura constituyen aproximadamente 96% del Universo. Al momento de escribir esto, la naturaleza exacta de la materia oscura y de la energía oscura sigue siendo un misterio. Las especulaciones abundan y las búsquedas continúan. Sólo es cuestión de esperar y ver.

Richard Feynman solía mover la cabeza y decir que no sabía nada. Cuando él y otros grandes físicos dicen que no saben nada, quieren decir que lo que *sí* saben está más cerca de la nada que de lo que *pueden* saber. Los científicos saben suficiente para darse cuenta de que tienen un puñado relativamente pequeño de un enorme Universo todavía lleno de misterios. Desde un punto de vista retrospectivo, los científicos de hoy saben muchísimo más que sus predecesores de hace un siglo, y los científicos entonces sabían mucho más que *sus* predecesores. Pero, desde el lugar privilegiado actual, al mirar hacia adelante, todavía hay tanto por aprender. El físico John A. Wheeler, consejero de posgrado de Feynman, vislumbró que el siguiente nivel de la física dejaría atrás el *cómo* y se ocuparía del *por qué*: el significado. Apenas se ha arañado la superficie.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Átomo.** La partícula más pequeña de un elemento que tiene todas las propiedades químicas del elemento.

**Movimiento browniano.** Movimiento azaroso de pequeñas partículas suspendidas en un gas o un líquido que resulta de su bombardeo por los átomos o moléculas de rápido movimiento del gas o líquido.

**Electrón.** Partícula con carga negativa que gira rápidamente dentro de un átomo.

**Núcleo atómico.** Centro de un átomo, que consiste en dos partículas subatómicas básicas: protones y neutrones.

**Neutrón.** Partícula eléctricamente neutra en el núcleo de un átomo.

**Protón.** Partícula con carga positiva en el núcleo de un átomo.

**Elemento.** Sustancia pura que consiste sólo en un tipo de átomo.

**Número atómico.** Número que designa la identidad de un elemento, que es el número de protones en el núcleo de un átomo; en un átomo neutro, el número atómico también es el número de electrones en el átomo.

**Tabla periódica de los elementos.** Tabla que menciona los elementos en filas horizontales por su número atómico y en columnas verticales por sus arreglos electrónicos y propiedades químicas similares. (Consulta la Figura 11.9.)

**Ión.** Átomo con carga eléctrica; un átomo con exceso o deficiencia de electrones.

**Isótopos.** Átomos del mismo elemento que contienen diferentes números de neutrones.

**Unidad de masa atómica (uma).** Unidad estándar de masa atómica, que es igual a 1/12 la masa del átomo más común de carbono. Una uma tiene una masa de $1.661 \times 10^{-27}$ kg.

**Compuesto.** Material en el que átomos de diferentes elementos están enlazados químicamente unos con otros.

**Mezcla.** Sustancia cuyos componentes están mezclados sin combinarse químicamente.

**Molécula.** Dos o más átomos que se enlazan mediante una compartición de electrones. Los átomos se combinan para convertirse en moléculas.

**Antimateria.** Forma "complementaria" de materia compuesta de átomos que tienen núcleos negativos y electrones positivos.

**Materia oscura.** Materia no vista y no identificada que es evidente por su tirón gravitacional sobre las estrellas en las galaxias. La materia oscura, junto con la energía oscura, constituyen tal vez 96% de la materia del Universo.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 11.1 La hipótesis atómica

1. ¿Quién promovió la idea de los átomos a comienzos del siglo XIX?
2. ¿Qué hace que las partículas de polvo y los pequeños granos de hollín se muevan con movimiento browniano?
3. ¿Quién explicó primero el movimiento browniano y proporcionó una explicación convincente de la existencia de los átomos?

### 11.2 Características de los átomos

4. ¿Cómo se compara el número aproximado de átomos en el aire de tus pulmones con el número de bocanadas de aire en la atmósfera de la Tierra?
5. ¿La mayoría de los átomos a tu alrededor son más jóvenes o más viejos que el Sol?

### 11.3 Imágenes atómicas

6. ¿Por qué los átomos no pueden verse con un poderoso microscopio óptico?
7. ¿Por qué los átomos pueden verse con un haz de electrones?
8. ¿Cuál es el propósito de un modelo en la ciencia?

### 11.4 Estructura atómica

9. ¿Dónde en el átomo se concentra la mayor parte de su masa?
10. ¿Qué se entiende por el término *nucleón*?
11. ¿Cómo se compara la carga eléctrica de un protón con la carga eléctrica de un electrón?
12. Dado que los átomos son principalmente espacio vacío, ¿por qué no caes a través del piso donde estás parado?
13. ¿Cuál es el elemento más ligero de todos?
14. ¿Cuál es el elemento más abundante en el Universo conocido?
15. ¿Cómo se formaron los elementos con núcleos más pesados que los del hidrógeno y el helio?
16. ¿Dónde se originaron los elementos más pesados?
17. ¿Cuáles son los cinco elementos más comunes en los seres humanos?

### 11.5 La tabla periódica de los elementos

18. ¿Qué te dice el número atómico de un elemento acerca del elemento?
19. ¿Cuántas capas se representan en la tabla periódica conocida en la actualidad?
20. ¿Qué tipo de atracción acerca a los electrones al núcleo atómico?
21. ¿Por qué los elementos más pesados no son mucho más grandes que los elementos más ligeros?

### 11.6 Isótopos

22. ¿Cómo difiere un isótopo de otro?
23. Distingue entre el número de masa y la masa atómica.

### 11.7 Compuestos y mezclas

24. ¿Qué es un compuesto? Cita dos ejemplos.
25. ¿Qué es una mezcla? Cita dos ejemplos.

### 11.8 Moléculas

26. ¿Cómo difiere una molécula de un átomo?
27. Comparada con la energía necesaria para separar oxígeno e hidrógeno del agua, ¿cuánta energía se libera cuando se recombinan?

### 11.9 Antimateria

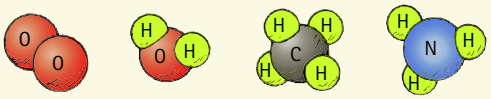
28. ¿Cómo difieren materia y antimateria?
29. ¿Qué ocurre cuando se encuentran una partícula de materia y una partícula de antimateria?
30. ¿Cuál es la evidencia de que existe la materia oscura?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

31. Una vela arderá sólo si hay oxígeno presente. ¿Una vela arderá el doble de tiempo en un frasco de litro invertido, comparado con un frasco de medio litro invertido? Pruébalo y observa.
32. Escribe una carta a tus abuelos donde describas cuánto tiempo han estado presentes los átomos que constituyen sus cuerpos. Y cuánto tiempo seguirán presentes.

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

33. Considera los siguientes átomos: A. oro, B. cobre, C. carbono y D. plata.
    Consulta la tabla periódica y clasifica estos átomos, de mayor a menor, por su
    a. masa.
    b. número de electrones.
    c. número de protones.
34. Clasifica el número de capas en estos átomos de gas noble, de mayor a menor:
    a. Argón b. Radón c. Helio d. Neón
35. Clasifica las masas de estas moléculas, de mayor a menor.




A B C D

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

36. ¿Cuántos tipos de átomos esperas encontrar en una muestra pura de cualquier elemento?
37. ¿Cuántos átomos individuales hay en una molécula de agua?
38. Cuando un contenedor de gas se calienta, ¿esperarías que sus moléculas aceleren, frenen o no sean afectadas?
39. La rapidez promedio de una molécula de vapor de perfume a temperatura ambiente puede ser de aproximadamente 300 m/s, pero descubrirás que la rapidez a la que la esencia viaja por la habitación es mucho menor. ¿Por qué?
40. ¿Cuál de los siguientes no es un elemento: hidrógeno, carbono, oxígeno, agua?
41. ¿Cuáles de los siguientes son elementos puros: $H_2$, $H_2O$, He, Na, NaCI, $H_2SO_4$, U?
42. Tu amigo dice que lo que distingue a un elemento de otro es el número de electrones alrededor del núcleo atómico. ¿Estás de acuerdo totalmente, parcialmente o nada en absoluto? Explica.
43. ¿Cuál es la causa del movimiento browniano del polvo y otras partículas pequeñas? ¿Por qué los objetos más grandes, como las pelotas de béisbol, no son afectados de forma similar?
44. ¿Cuántos átomos hay en una molécula de ácido sulfúrico, $H_2SO_4$?
45. Los números de masa de dos isótopos de cobalto son 59 y 60. (a) ¿Cuántos protones y cuántos neutrones hay en cada isótopo? (b) ¿Cuántos electrones en órbita tiene un átomo de cada uno cuando los átomos son eléctricamente neutros?
46. Un átomo particular contiene 29 electrones, 34 neutrones y 29 protones. ¿Cuál es la identidad de este elemento y cuál es su número atómico?
47. Si dos protones y dos neutrones se quitan del núcleo de un átomo de oxígeno, ¿qué núcleo permanece?
48. ¿Qué elemento resulta si agregas un par de protones al núcleo de mercurio? (Consulta la tabla periódica.)
49. ¿Qué elemento resulta si dos protones y dos neutrones se expulsan de un núcleo de radio?
50. Para convertirse en un ión negativo, ¿un átomo pierde o gana un electrón?
51. Para convertirse en un ión positivo, ¿un átomo pierde o gana un electrón?
52. Podrías tragarte una cápsula de germanio sin efectos dañinos. Pero, si se agrega un protón a cada uno de los núcleos de germanio, no querrías tragar la cápsula. ¿Por qué? (Consulta la tabla periódica.)

53. El helio es un gas inerte, lo que significa que no se combina fácilmente con otros elementos. ¿Cuáles otros cinco elementos también esperarías que fueran gases inertes? (Consulta la tabla periódica.)
54. ¿Cuál de los siguientes elementos predecirías que tiene propiedades más parecidas a las del silicio (Si): aluminio (Al), fósforo (P) o germanio (Ge)? (Consulta la tabla periódica.)
55. ¿Cuál contribuye más a la masa de un átomo: los electrones o los protones? ¿Cuál contribuye más al tamaño de un átomo?
56. Un átomo de hidrógeno y un átomo de carbono se mueven con la misma rapidez. ¿Cuál tiene mayor energía cinética?
57. En una mezcla gaseosa de gases hidrógeno y oxígeno, ambos con la misma energía cinética, ¿cuáles moléculas se mueven más rápido en promedio?
58. Los átomos que constituyen tu cuerpo son principalmente espacio vacío, y estructuras como la silla donde te sientas están compuestas de átomos que también son principalmente espacio vacío. Entonces, ¿por qué no te caes a través de la silla?
59. Elabora una pregunta de opción múltiple que demuestre que tus compañeros de clase pueden distinguir entre cualesquiera dos términos de la lista de Resumen de términos.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

60. Un gato pasea por tu patio. Una hora después, un perro con la nariz en el suelo sigue el rastro del gato. Discute este suceso desde el punto de vista molecular.
61. Si no pudieran escapar moléculas de un cuerpo, ¿el cuerpo tendría algún olor?
62. ¿Dónde se "fabricaron" los átomos que constituyen a un recién nacido?
63. Discute por qué iguales masas de bolas de golf y de ping pong no contienen el mismo número de bolas.
64. Discute por qué iguales masas de átomos de carbono y átomos de oxígeno no contienen el mismo número de partículas.
65. Discute cuál contiene más átomos: 1 kg de plomo o 1 kg de aluminio.
66. Un átomo de carbono, con una capa exterior medio llena de electrones (cuatro en una capa que puede contener ocho) comparte fácilmente sus electrones con otros átomos y forma un gran número de moléculas, muchas de las cuales son las moléculas orgánicas que forman el cúmulo de materia viviente. Observa la tabla periódica, ¿cuál otro elemento crees que pueda tener una función como la del carbono en las formas de vida en algún otro planeta?
67. ¿En qué sentido puedes decir fidedignamente que eres parte de toda persona en la historia? ¿En qué sentido puedes decir que formarías parte de manera tangible de toda persona que seguirá sobre la Tierra?
68. ¿Cuáles son las posibilidades de que al menos uno de los átomos exhalados por tu primera bocanada en la vida estará en tu siguiente bocanada?
69. Hidrógeno y oxígeno siempre reaccionan en una razón 1:8 por masa para formar agua. Los antiguos investigadores pensaban que esto significaba que el oxígeno era ocho veces más masivo que el hidrógeno. ¿Qué fórmula química supusieron estos investigadores para el agua?
70. Alguien le dijo a tu amigo que, si un extraterrestre de antimateria alguna vez pusiera el pie sobre la Tierra, todo el mundo explotaría en energía radiante pura. Tu amigo busca tu aprobación o refutación a esta afirmación. ¿Tú qué dices?

# 12

CAPÍTULO 12

# Sólidos


12.1 Estructura cristalina

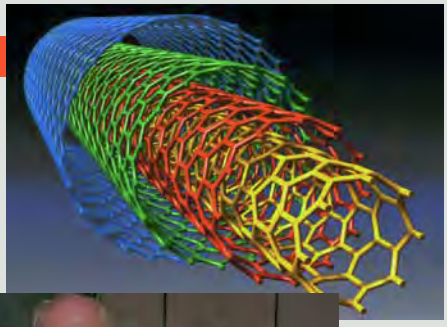
12.2 Densidad

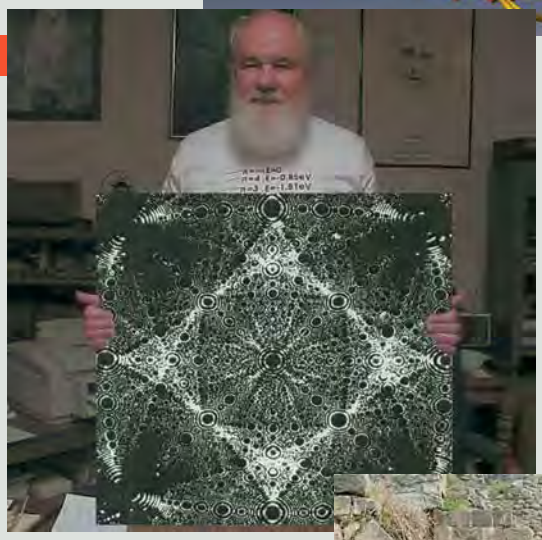
12.3 Elasticidad

12.4 Tensión y compresión

12.5 Arcos

12.6 Escalamiento



1 Nanotubos de carbono anidados uno dentro de otro proporcionan fibras enormemente fuertes. 2 John Hubisz muestra una imagen ampliada de esta histórica micrografía de 1958 tomada por Eric Müller. 3 La compresión entre piedras contiguas explica la fuerza de los arcos semicirculares que durante siglos se han utilizado en la construcción de portales, puentes y muchas otras estructuras. 4 Estudiantes aplican los principios del escalamiento cuando construyen modelos de puentes en papel durante la clase de física de Garth Orr.

John Hubisz fue un madrugador. ¡Comenzó a enseñar a los 17 años de edad y nunca se detuvo! Sus enseñanzas se aceleraron después de obtener su doctorado en física y ciencia espacial por parte de la York University en Toronto, Ontario. ¡John ha enseñado física durante más de medio siglo! Mientras enseñaba en el College of the Mainland en Texas, se convirtió en el presidente de la sección Texas de la American Association of Physics Teachers (TSAAPT: Asociación Estadounidense de Profesores de Física Sección Texas). Un par de décadas después, él y su esposa, Jola, profesora especializada en problemas de aprendizaje, comenzaron una nueva vida en Carolina del Norte en la Universidad Estatal de Carolina del Norte y en el Wake County Public School System (sistema de educación pública del condado de Wake). Al no haber una sección de la AAPT específica para Carolina del Norte, John fundó una, que en la actualidad es una de las más dinámicas en Estados Unidos. Fungió como secretario-tesorero durante muchos años, fue electo presidente de la sección y después presidente de la AAPT nacional.

John y Jola son lectores ávidos. La biblioteca es una de las partes principales de su casa, donde pueden encontrarse muchos libros de física, matemáticas, ciencia ficción, teología, historia y filosofía, algunos incluso agotados.

La especialidad de John en la docencia es aumentar el número de especialistas en física. Su primer curso es conceptual. Ha usado *Física conceptual* desde su primera edición en 1972 y ha continuado con las ediciones subsecuentes. John considera que primero debe estimularse el interés de los estudiantes y después, luego de un panorama de física general, continuar con física más computacional.

A finales de la década de 1970 y comienzos de la de 1990, una de las aventuras de John fue mejorar la calidad de los libros de texto de física mediante la exposición pública de los muchos errores que él y otros habían descubierto. En esa época, algunos editores pasaban por alto descaradamente los errores de los libros de texto. Desde la exposición de John, los estudiantes de todas partes tienen libros de texto con mucho menos errores.

La vida de servicio de John rebasa con mucho sus actividades en física. Aunque por lo general no se le conoce afuera de su círculo de amistades, él y Jola han adoptado y patrocinado a docenas de jóvenes de varias partes del mundo, algunos de manera legal y otros en espíritu, para facilitar su camino hacia la educación superior. Sus "hijos" han crecido y se han convertido en médicos, ingenieros y, sí, un investigador en física. La vida de servicio de John no conoce fronteras. Hombre de fe y católico comprometido, funge como clérigo en la diócesis de Raleigh.

Además de representar maravillosamente la profesión de maestro de física, John es un ser humano extraordinario.

## 12.1 Estructura cristalina

Los metales, las sales y la mayor parte de los minerales, los materiales de la Tierra, están constituidos de cristales. Las personas han conocido durante siglos cristales como la sal y el cuarzo, pero no fue sino hasta el siglo XX cuando se descubrió que los cristales eran arreglos regulares de átomos. En 1912, los físicos usaron rayos X para confirmar que cada cristal es un arreglo tridimensional ordenado: una retícula cristalina de átomos. Se midió que los átomos en un cristal están muy juntos, aproximadamente separados por la misma distancia que la longitud de onda de los rayos X.

El físico alemán Max von Laue descubrió que un haz de rayos X dirigido hacia un cristal se difracta, o separa, en un patrón característico (Figura 12.1). Los *patrones de difracción* de rayos X sobre una película fotográfica muestran que los cristales son mosaicos bien ordenados de átomos sentados sobre retículas regulares, como tableros de ajedrez tridimensionales o juegos infantiles de tubos. Metales como el hierro, el cobre y el oro tienen estructuras cristalinas relativamente simples. El estaño y el cobalto son un poco más complejos. Todos los metales contienen una mescolanza de muchos cristales, cada uno casi perfecto, con la misma retícula regular pero con alguna inclinación respecto del cristal más cercano. Estos cristales metálicos pueden verse cuando una superficie metálica se *graba*, o limpia, con ácido. Puedes ver las estructuras cristalinas en la superficie del hierro galvanizado expuesta al clima, o sobre los pomos de las puertas de latón grabadas por la sudoración de muchas manos.

**pti**

- Los seres humanos han utilizado materiales sólidos durante muchos miles de años. Los nombres de los periodos históricos de la edad de piedra, la edad de bronce y la edad de hierro manifiestan la importancia de los materiales sólidos en el desarrollo de la civilización. Los números y usos de los materiales se multiplicaron a través de los siglos, aunque se avanzó poco en la comprensión de la naturaleza de los sólidos. Esta comprensión tuvo que esperar los descubrimientos acerca de los átomos que tuvieron lugar en el siglo XX. Con dicho conocimiento, los investigadores ahora inventan nuevos materiales diariamente y satisfacen las demandas de la era de la información de hoy.

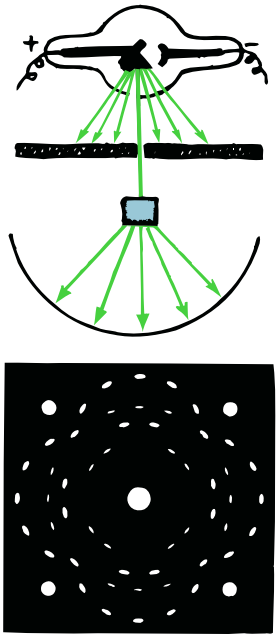


**FIGURA 12.1**
Determinación con rayos X de una estructura cristalina. La fotografía de la sal de mesa común (cloruro de sodio) es producto de la difracción de rayos X. Los rayos provenientes del tubo de rayos X se bloquean con una pantalla de plomo excepto por un estrecho haz que golpea al cristal de sal. La radiación que penetra el cristal y llega a la película fotográfica crea el patrón mostrado. La mancha blanca del centro se debe al haz principal no dispersado de rayos X. El tamaño y orden de las demás manchas son resultado de la estructura reticular de los iones de sodio y cloro en el cristal. Un cristal de cloruro de sodio siempre produce este mismo diseño. Toda estructura cristalina tiene su propia imagen única de difracción de rayos X.

Las fotografías de von Laue de los patrones de difracción de rayos X fascinaron a los científicos ingleses William Henry Bragg y a su hijo William Lawrence Bragg, quienes desarrollaron una fórmula matemática que demostró exactamente cómo deben dispersarse los rayos X de las varias capas atómicas regularmente espaciadas de un cristal. Con esta fórmula y un análisis del patrón de manchas en un patrón de difracción, pudieron determinar las distancias entre los átomos de un cristal. En la actualidad, la difracción de rayos X es una herramienta vital de la biología y la física.

Se dice que los sólidos no cristalinos son *amorfos*. En el estado amorfo, los átomos y las moléculas de un sólido se distribuyen de manera aleatoria. El caucho, el vidrio y el plástico están entre los materiales que carecen de un arreglo ordenado repetitivo de sus partículas básicas. En muchos sólidos amorfos, las partículas tienen cierta libertad para deambular. Esto es evidente en la elasticidad del caucho y la tendencia del vidrio a fluir cuando se sujeta a un esfuerzo durante largos periodos.

Ya sea que los átomos estén en un estado cristalino o en un estado amorfo, cada átomo o ión vibra en torno a su propia posición. Los átomos están ligados mediante fuerzas de enlace eléctrico. No se abordará en este momento el **enlace atómico**, excepto para mencionar los cuatro tipos principales de enlaces en los sólidos: iónico, covalente, metálico y de van der Waals, de los cuales el último es el más débil. Algunas propiedades de los sólidos están determinadas por los tipos de enlaces que tienen. En Internet o en casi cualquier texto de química puedes encontrar más información sobre estos enlaces.

Los patrones de difracción del ADN (similares al de la sal que se muestra aquí), realizados por Maurice Wilkins y Rosalind Franklin en 1953, proporcionaron los datos a partir de los cuales James D. Watson y Francis Crick dedujeron la estructura de doble hélice del ADN.

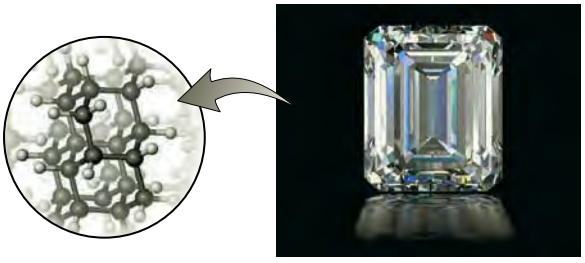


**FIGURA 12.2**
La estructura cristalina del diamante se ilustra con barras que representan los enlaces covalentes que le confieren su extrema dureza.

La fuerza de van der Waals es el mecanismo que proporciona la adhesión de los muchos surcos en las patas de un gecko.

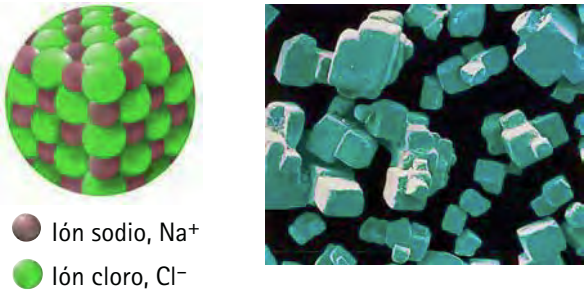



**FIGURA 12.3**
La estructura cristalina cúbica de la sal común vista a través de un microscopio. La forma cúbica es consecuencia del arreglo cúbico de los iones de sodio y cloro.

## EL PODER DE LOS CRISTALES

La estructura interna regularmente repetitiva de los átomos de los cristales les brinda propiedades estéticas que desde hace mucho los han hecho atractivos para la joyería. Los cristales también tienen propiedades que son muy importantes para la industria electrónica y óptica, y se usan casi en todo tipo de tecnología moderna. En épocas pasadas, los cristales se valoraban por sus supuestos poderes curativos. Esta creencia continúa en la actualidad, en particular entre los ocultistas y los curadores New Age. Se dice que los cristales canalizan la "energía buena" y alejan la "energía mala". Llevan "vibraciones" que resuenan con las "frecuencias" curativas que ayudan a mantener un equilibrio corporal benéfico. Cuando se disponen de manera adecuada, se dice que los cristales brindan protección contra las fuerzas electromagnéticas dañinas emitidas por las líneas eléctricas, teléfonos celulares, monitores de computadora, hornos de microondas y otras personas. Se ha dicho que está "probado médicamente" que los cristales curan y protegen y que tales afirmaciones están "respaldadas por físicos ganadores del Premio Nobel".

Los cristales *sí* liberan energía, como lo hace cualquier otro objeto. En el Capítulo 16 aprenderás que todas las cosas radian energía, y también que todas las cosas absorben energía. Si un cristal, o cualquier sustancia, radia más energía de la que recibe, su temperatura desciende. Los átomos de los cristales *sí* vibran y *sí* resuenan con frecuencias que coinciden con vibraciones externas, tal como lo hacen las moléculas de todos los gases y de todos los líquidos. Si los que conjeturan sobre el poder de los cristales hablan de algún tipo de energía especial de los cristales, o de la vida, no hay ninguna evidencia científica que lo respalde (el descubridor de tal tipo especial de energía rápidamente se convertiría en celebridad mundial). Desde luego, algún día podría encontrarse evidencia de un nuevo tipo de energía, como la energía oscura de la que se habló en el Capítulo 11, pero esto no es lo que afirman los que conjeturan sobre el poder de los cristales, quienes aseguran que hay evidencia científica moderna que sustenta sus afirmaciones.

La evidencia del poder de los cristales no es experimental; más bien, se limita a *testimonios*. Como lo ilustra la publicidad, es más fácil persuadir a las personas con testimonios que con hechos confirmados. Los testimonios de personas que están convencidas de los beneficios personales de los cristales son frecuentes. Que te convenzan con evidencia científica es una cosa; que te convenzan con ilusiones, reforzamiento colectivo o con un efecto placebo es muy diferente. Ninguna de las afirmaciones de los poderes especiales de los cristales ha sido respaldada jamás con evidencia científica.

Afirmaciones aparte, el usar aretes de cristal parece brindar a algunas personas una buena *sensación*, incluso una sensación de protección. Estas sensaciones, y las cualidades estéticas de los cristales, son sus auténticas virtudes. Algunas personas creen que los cristales brindan buena suerte, tal como se supone lo hace el llevar una pata de conejo en el bolsillo. Sin embargo, la diferencia entre el poder de los cristales y el de la pata de conejo es que los beneficios de los cristales se expresan en términos científicos, en tanto que las afirmaciones de los beneficios de portar una pata de conejo no. Por tanto, quienes conjeturan sobre el poder de los cristales están en la pseudociencia hecha y derecha.

## 12.2 Densidad

¿El hierro es más pesado que la madera? La pregunta es ambigua, porque depende de las cantidades de hierro y de madera. Un tronco grande claramente es más pesado que un clavo de hierro. Una mejor pregunta es: ¿el hierro es *más denso* que la madera?, y entonces la respuesta es *sí*, el hierro es más denso que la madera. Las masas de los átomos y el espaciamiento entre ellos determinan la **densidad** de los materiales. Se piensa en la densidad como la "ligereza" o "pesadez" de los materiales del mismo tamaño. Es una medida de lo compacto de la materia, de cuánta masa ocupa un espacio dado; es la cantidad de masa por unidad de volumen:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

La densidad (también llamada masa específica) es una propiedad de un material; no importa cuánto material realmente tengas. En la Tabla 12.1 se presentan las densidades de algunos materiales. Por lo general, la densidad se expresa en unidades métricas: kilogramos por metro cúbico, kilogramos por litro o gramos por centímetro cúbico. El agua, por ejemplo, tiene una densidad de masa de 1 g/cm$^3$ o, de manera equivalente, 1,000 kg/m$^3$. De modo que la masa de un metro cúbico de agua fresca es 1,000 kg mientras que, de manera equivalente, la masa de un centímetro cúbico (aproximadamente el tamaño de un cubo de azúcar) de agua fresca es 1 g.

La densidad puede expresarse en términos de peso más que de masa. Esto es *densidad de peso*, comúnmente llamada peso específico, que se define como peso por unidad de volumen:

$$\text{Densidad de peso} = \frac{\text{peso}}{\text{volumen}}$$

**FIGURA 12.4**
Cuando el volumen del pan se reduce, su densidad aumenta.

**SCREENCAST: Sólidos**

Un metro cúbico es un volumen mensurable y contiene un millón de centímetros cúbicos. En un metro cúbico hay un millón de gramos de agua (o, de manera equivalente, 1,000 kilogramos de agua en un metro cúbico); por tanto, 1 g/cm$^3$ = 1,000 kg/m$^3$.

**TABLA 12.1**
**DENSIDADES DE SUSTANCIAS COMUNES (kg/m³) (PARA DENSIDAD EN g/cm³, DIVIDE ENTRE 1,000)**

| Sólidos | Densidad |
|---|---|
| Iridio | 22,650 |
| Osmio | 22,610 |
| Platino | 21,090 |
| Oro | 19,300 |
| Uranio | 19,050 |
| Plomo | 11,340 |
| Plata | 10,490 |
| Cobre | 8,920 |
| Hierro | 7,870 |
| Aluminio | 2,700 |
| Hielo | 919 |
| **Líquidos** | |
| Mercurio | 13,600 |
| Glicerina | 1,260 |
| Agua de mar | 1,025 |
| Agua a 4 °C | 1,000 |
| Alcohol etílico | 785 |
| Gasolina | 680 |

**SCREENCAST:** Problema cuarzo-oro

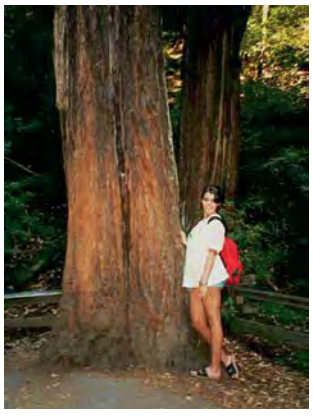


**FIGURA 12.5**
Tanto Stephanie como el árbol están compuestos principalmente de hidrógeno, oxígeno y carbono. La ingestión de alimentos le proporciona éstos a Stephanie, en tanto que el árbol obtiene la mayor parte de su oxígeno y carbono del aire. En este sentido, un árbol puede considerarse como "aire sólido".

La densidad de peso se mide en N/m³. Dado que un cuerpo de 1 kg tiene un peso de 9.8 N, la densidad de peso es numéricamente 9.8 × densidad de masa. Por ejemplo, la densidad de peso del agua es 9,800 N/m³. En el sistema británico, 1 pie cúbico (ft³) de agua fresca (casi 7.5 galones) pesa 62.4 libras. Por tanto, en el sistema británico, el agua fresca tiene una densidad de peso de 62.4 lb/ft³.

La densidad de un material depende de las masas de cada átomo que lo constituye y del espaciamiento entre dichos átomos. El iridio, un metal blanco-plateado, duro y quebradizo, de la familia del platino, es la sustancia más densa sobre la Tierra. Aunque cada átomo de iridio es menos masivo que cada átomo de platino, oro, plomo o uranio, el poco espaciamiento de los átomos de iridio en la forma cristalina contribuye a su mayor densidad. Más átomos de iridio caben en un centímetro cúbico que otros átomos más masivos, pero con espacios más amplios. En consecuencia, el iridio tiene una colosal densidad de 22,650 kg/m³.

**PUNTO DE CONTROL**

1. ***Aquí va una facilita*: Cuando el agua se congela, se expande. ¿Qué dice esto acerca de la densidad del hielo comparada con la densidad del agua?**
2. ***Aquí va una un poco más truculenta*: ¿Qué pesa más: un litro de hielo o un litro de agua?**
3. **¿Cuál tiene mayor densidad: 100 kg de plomo o 1,000 kg de aluminio?**
4. **¿Cuál es la densidad de 1,000 kg de agua?**
5. **¿Cuál es el volumen de 1,000 kg de agua?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. El hielo es menos denso que el agua (porque tiene más volumen para la misma masa), por lo que el hielo flota en el agua.
2. ¡No digas que pesan lo mismo! Un litro de agua pesa más. Si está congelada, entonces su volumen será más que un litro. Si recortas la parte que sobresale, de modo que el trozo de hielo tenga el mismo tamaño que el litro de agua original, ciertamente pesará menos.
3. La densidad es una *razón* de masa y volumen (o peso y volumen), y esta razón es mayor para cualquier cantidad de plomo que para cualquier cantidad de aluminio; consulta la Tabla 12.1.
4. La densidad de *cualquier* cantidad de agua es 1,000 kg/m³ (o 1 g/cm³).
5. El volumen de 1,000 kg de agua es 1 m³.

## 12.3 Elasticidad

Cuando un objeto está sujeto a fuerzas externas, experimenta cambios en su tamaño, o en su forma, o en ambos. Los cambios dependen del arreglo y enlace de los átomos del material. Un resorte, por ejemplo, puede estirarse o comprimirse mediante fuerzas externas.

Un peso que se cuelga de un resorte estira el resorte. Si se agrega peso, se estira aún más. Si los pesos se retiran, el resorte regresa a su longitud original. Se dice que el resorte es *elástico*. Cuando un bateador golpea una pelota de béisbol, el bate temporalmente cambia la forma de la bola. Un arquero, a punto de disparar una flecha, primero dobla el arco, que recupera su forma original cuando la flecha se suelta. El resorte, la pelota de béisbol y el arco son ejemplos de objetos elásticos. La **elasticidad** de un cuerpo describe cuánto cambia su forma cuando una fuerza deformadora actúa sobre él, y cómo regresa a su forma original cuando la fuerza se retira. La masilla, la arcilla, la masa

para panadería y el plomo *no* regresan a su forma original cuando se aplica una fuerza deformadora y luego se quita. Los materiales como éstos, que no recuperan su forma original después de deformarse, se dice que son *inelásticos*.

Cuando cuelgas un peso sobre un resorte, el peso aplica una fuerza al resorte y esto estira el resorte. El doble de peso causa el doble de estiramiento; el triple de fuerza causa el triple de estiramiento. Más pesos estiran el resorte aún más. Es posible decir que:

$$F \sim \Delta x$$

Es decir, el estiramiento es directamente proporcional a la fuerza aplicada (Figura 12.7). Esta relación, que a mediados del siglo XVII observó el físico británico Robert Hooke, contemporáneo de Isaac Newton, se llama **ley de Hooke**.

Si un material elástico se estira o comprime más allá de determinada cantidad, no regresará a su estado original y permanecerá distorsionado. La distancia más allá de la cual ocurre una distorsión permanente se llama *límite elástico*. La ley de Hooke se sostiene sólo en tanto la fuerza no estire o comprima el material más allá de su límite elástico.

**FIGURA 12.6**
Una pelota de béisbol es elástica.

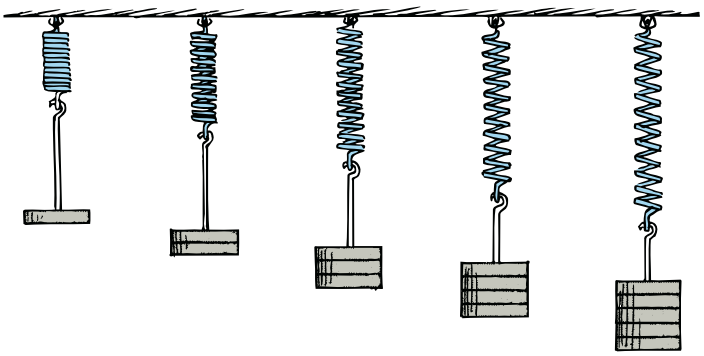


**FIGURA 12.7**
El estiramiento del resorte es directamente proporcional a la fuerza aplicada. Si el peso se duplica, el resorte se estira el doble.

## PUNTO DE CONTROL

1. **Una antigua pintura de 2 kg cuelga del extremo de un resorte. El resorte se estira una distancia de 10 cm. Si, en lugar de ella, del mismo resorte se cuelga una pintura de 4 kg, ¿cuánto se estirará el resorte? ¿Y si del mismo resorte se cuelga una pintura de 6 kg? (Supón que ninguna de estas cargas estira el resorte más allá de su límite elástico.)**
2. **Si una fuerza de 10 N estira cierto resorte 4 cm, ¿cuánto estiramiento ocurrirá con una fuerza aplicada de 15 N?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Una carga de 4 kg (la pintura en este caso) tiene el doble de peso que una carga de 2 kg. De acuerdo con la ley de Hooke, $F \sim \Delta x$, 2 veces la fuerza aplicada resulta en 2 veces el estiramiento, de modo que el resorte se estira 20 cm. El peso de la carga de 6 kg hace que el resorte se estire 3 veces, 30 cm. (Si se supera el límite elástico, la cantidad de estiramiento no podría predecirse con la información dada.)
2. El resorte se estirará 6 cm. Por razón y proporción (10 N)/(4 cm) = (15 N)/($x$ cm), que se lee: 10 newtons es a 4 centímetros como 15 newtons es a $x$ centímetros; entonces $x$ = 6 cm. Si tomas clases en el laboratorio, aprenderás que la razón entre la fuerza y el estiramiento se llama *constante de resorte, k* (en este caso, $k$ = 2.5 N/cm), y la ley de Hooke se expresa con la ecuación $F = k\Delta x$.

**pti**

- Robert Hooke, uno de los más grandes científicos de Inglaterra, fue el primero en proponer una teoría ondulatoria de la luz y el primero en describir la célula (por lo que llegó a considerarse como el padre de la microscopía). Como artista y agrimensor, ayudó a Christopher Wren a reconstruir Londres después del gran incendio de 1666. Como físico, colaboró con Robert Boyle y otros físicos de su época y fue elegido para encabezar la Royal Society. A la muerte de Hooke, Isaac Newton se convirtió en presidente de la Royal Society y celosamente destruyó todo lo que pudo de la obra de Hooke. En la actualidad no sobreviven pinturas ni cosas similares de Robert Hooke.

## 12.4 Tensión y compresión

Cuando algo se jala (se estira), se dice que está en *tensión*. Cuando se empuja (se oprime), está en *compresión*. Si doblas una regla (o cualquier vara), la parte curvada exterior está en tensión. La parte curvada interior, sobre la que se empuja, está en compresión. La tensión hace que las cosas se alarguen y se adelgacen, en tanto que la compresión hace que las cosas se acorten y se ensanchen. Sin embargo, esto no es tan evidente en la mayoría de los materiales rígidos, porque el alargamiento o el acortamiento es muy pequeño.

El acero es un excelente material elástico porque puede soportar grandes fuerzas y luego regresar a su tamaño y forma originales. Debido a su resistencia y propiedades elásticas, se usa no sólo para fabricar resortes, sino también para vigas de construcción. Las vigas verticales de acero utilizadas en la construcción de edificios altos experimentan sólo una compresión ligera. Una viga de acero vertical típica de 25 metros de largo (columna) utilizada en la construcción de rascacielos se comprime aproximadamente un milímetro cuando soporta una carga de 10 ton. Esto puede acumularse. Un edificio de 70 a 80 pisos puede comprimir las enormes columnas de acero en su base aproximadamente 2.5 centímetros (toda una pulgada) cuando se concluye la construcción.

**pti**

- El esmalte de tus dientes es la sustancia más dura de tu cuerpo.

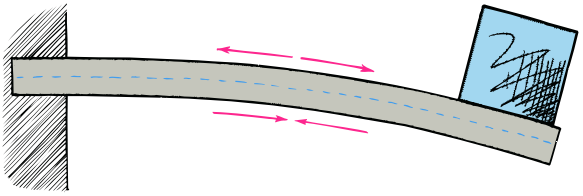


**FIGURA 12.8**
La parte superior de la viga se estira y la parte inferior se comprime. ¿Qué ocurre en la porción media, entre las partes superior e inferior?

Hay más deformación cuando las vigas se usan horizontalmente, donde tienden a pandearse bajo cargas pesadas. Cuando una viga horizontal se sostiene en uno o ambos extremos, está bajo tensión y bajo compresión tanto de su peso como de la carga que soporta. Considera la viga horizontal sostenida de un extremo (conocida como viga voladiza) de la Figura 12.8. Se pandea debido a su propio peso y al de la carga que soporta en su extremo. Un poco de razonamiento te mostrará que la parte superior de la viga tiende a estirarse. Los átomos tienden a separarse. La parte superior es un poco más larga y está bajo tensión. Más razonamiento revela que la parte inferior de la viga está oprimida. Ahí los átomos se apachurran contra los demás: están comprimidos. La parte inferior es un poco más corta debido a la forma en que se dobla. ¿Puedes ver que, en alguna parte entre la parte superior y la inferior, hay una región donde no sucede nada, donde no hay ni tensión ni compresión? Esta es la *capa neutra*.

Un trampolín con un clavadista de pie en un extremo es una viga voladiza.

La viga horizontal que se muestra en la Figura 12.9, conocida como viga simple, está sostenida en ambos extremos y lleva una carga en medio. Aquí hay compresión en la parte superior de la viga y tensión en la parte inferior. De nuevo, hay una capa neutra a lo largo de la porción media del grosor de la viga en toda su longitud.

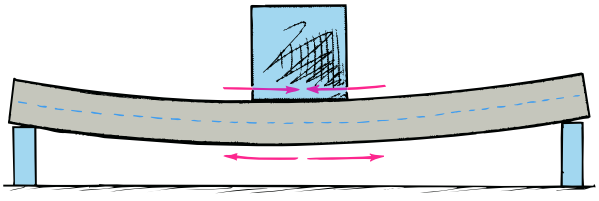
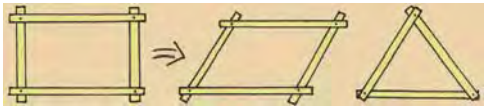


**FIGURA 12.9**
La parte superior de la viga está comprimida y la parte inferior está estirada. ¿Dónde está la capa neutra (la parte que no está bajo esfuerzo debido a tensión o compresión)?

## PRACTICANDO LA FÍSICA: FUERZA DE LAS VARAS

Si clavas cuatro varas para formar un rectángulo, pueden deformarse en un paralelogramo sin demasiado esfuerzo. Pero, si clavas tres varas para formar un triángulo, la forma no puede cambiarse sin realmente romper las varas o desprender los clavos. El triángulo es la más fuerte de todas las figuras geométricas, es por eso que en los puentes se ven formas triangulares. Adelante: clava tres varas e inténtalo, y luego mira los triángulos que se utilizan para fortalecer muchas clases de estructuras.



Con la capa neutra en mente, puedes ver por qué la sección transversal de las vigas de acero tiene la forma de la letra I (Figura 12.10). La mayor parte del material de estas vigas I se concentra en las *aletas* superior e inferior. Cuando la viga se utiliza horizontalmente en construcción, el esfuerzo es predominantemente en las aletas superior e inferior. Una aleta se oprime mientras la otra se estira, y las dos aletas virtualmente soportan todos los esfuerzos en la viga. Entre las aletas hay una región relativamente libre de esfuerzo, el *alma*, que actúa sobre todo para mantener bien separadas las aletas superior e inferior. Debido al alma, se necesita comparativamente poco material. Una viga I es casi tan fuerte como una barra rectangular sólida de las mismas dimensiones totales, con mucho menos peso. Una viga rectangular larga de acero después de cierto tiempo puede quebrarse debido a su propio peso, en tanto que una viga I de la misma profundidad podría soportar mucho más carga.

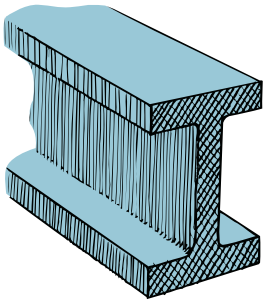
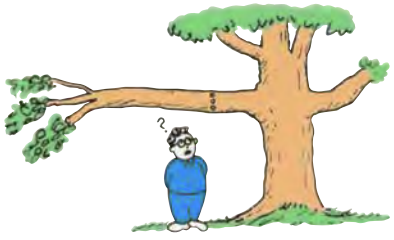


**FIGURA 12.10**
Una viga I es como una barra sólida a la que se le quitó parte del acero de en medio, donde se necesita menos. En consecuencia, la viga es más ligera, pero tiene casi la misma fuerza.

**FIGURA 12.11**
La mitad superior de cada rama horizontal está bajo tensión debido al peso de la rama, en tanto que la mitad inferior está bajo compresión. ¿En qué lugar la madera no está ni estirada ni comprimida?

### PUNTO DE CONTROL

1. **Cuando caminas sobre el entarimado de una casa antigua que se pandea debido a tu peso, ¿dónde está la capa neutra?**
2. **Supón que taladras un agujero horizontalmente a través de la rama de un árbol, como se muestra. ¿Dónde el agujero debilita menos la rama: a través de la porción superior, la porción media o la porción inferior de la rama?**



**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La capa neutra está a la mitad entre las superficies superior e inferior del entarimado.
2. Taladra el agujero horizontalmente a través del medio de la rama, a través de la capa neutra: un agujero en dicha ubicación difícilmente afectará la resistencia de la rama porque las fibras ahí no están ni estiradas ni comprimidas. Las fibras de madera de la parte superior están estiradas, de modo que taladrar un agujero ahí puede hacer que las fibras se separen. Las fibras de la parte inferior están comprimidas, de modo que al taladrar un agujero ahí puede aplastarse bajo compresión.

## 12.5 Arcos

La piedra se rompe con más facilidad bajo tensión que bajo compresión. Los techos de estructuras de piedra construidos por los egipcios durante la época de las pirámides se construyeron con muchas losas de piedra horizontales. Debido a la debilidad de dichas losas bajo las fuerzas producidas por la gravedad, tuvieron que erigirse muchas columnas verticales que soportaran los techos. Lo mismo sucedió con los templos en la antigua Grecia. Luego llegaron los arcos y menos columnas verticales.

**FIGURA 12.12**
Las losas horizontales de piedra del techo no pueden ser muy largas porque la piedra se rompe fácilmente bajo tensión. Es por eso que se necesitan muchas columnas verticales para soportar el techo.

**FIGURA 12.13**
Arcos de piedra semicirculares comunes, que han permanecido en pie durante siglos.

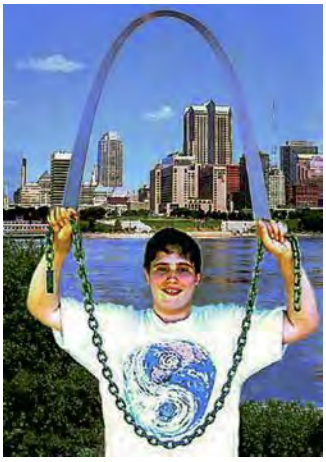


**FIGURA 12.14**
Tanto la curva de una cadena colgante sostenida por Manuel como el Gateway Arch de St. Louis son catenarias.

Observa la parte superior de las ventanas de los antiguos edificios de ladrillo. Hay posibilidades de que la parte superior sea arqueada. Lo mismo ocurre con la forma de los antiguos puentes de piedra. Cuando se coloca una carga sobre una estructura arqueada de manera adecuada, la compresión refuerza en lugar de debilitar la estructura. Las piedras se empujan entre sí más firmemente y se mantienen unidas mediante fuerzas compresivas. Con la forma correcta del arco, las piedras ni siquiera necesitan cemento para mantenerse unidas.

Cuando la carga que se soporta es uniforme y se extiende horizontalmente, como en un puente, la forma adecuada es una parábola, la misma curva que sigue una bola lanzada. Los cables de un puente colgante son un ejemplo de un arco parabólico "de cabeza". Si, por otra parte, el arco sólo se sostiene por su propio peso, la curva que le brinda máxima fuerza se llama *catenaria*. Una catenaria es una curva que se forma por una soga o cadena colgada entre dos puntos de apoyo. La tensión a lo largo de cada parte de la soga o cadena es paralela a la curva. De modo que, cuando un arco libre adopta la forma de una catenaria invertida, la compresión en su interior es paralela en todas partes al arco, de la misma manera como la tensión entre eslabones contiguos de una cadena colgante es paralela en todas partes a la cadena. El Gateway Arch, que decora la ribera de St. Louis, Missouri, es una catenaria (Figura 12.14).

**FIGURA 12.15**
El peso del domo produce compresión, no tensión, de modo que no se necesitan columnas de soporte en medio.

Si giras un arco a través de un círculo completo, tienes un domo. El peso del domo, como el del arco, produce compresión. Los domos modernos, como el Astrodome de Houston, están inspirados en catenarias tridimensionales y cubren grandes áreas sin la interrupción de columnas. Hay domos bajos (el monumento a Jefferson) y altos (el Capitolio de Estados Unidos). Y mucho antes que éstos, hubo iglúes en el Ártico.

**pti**

- ¡Un arco en forma de catenaria incluso podría fabricarse con bloques resbaladizos de hielo! Siempre que las fuerzas compresivas entre los bloques sean paralelas al arco y que la temperatura no aumente lo suficiente para causar su derretimiento, el arco permanecerá estable.

## FABRICACIÓN ADITIVA O IMPRESIÓN 3-D

En la fabricación a través de los siglos, los artesanos comenzaron con un trozo de material al que le retiraban pedazos con cortes y perforaciones hasta que elaboraban un producto terminado, un *proceso sustractivo*. Pero la naturaleza siempre lo ha hecho de manera diferente en los procesos biológicos. En lugar de quitar material (y desecharlo), la naturaleza construye las cosas átomo por átomo, un *proceso aditivo*. Durante más de una década, las impresoras de inyección de tinta han hecho en gran parte lo mismo, precisamente escupiendo una serie de gotas de tinta para producir imágenes, gota a gota. Era cuestión de tiempo antes de que este proceso pasara de depositar tinta para formar imágenes, a depositar gotas de material para elaborar objetos sólidos. Dicha tecnología llegó y transformó la forma de fabricar las cosas.

Este proceso de impresión tridimensional usa tecnología digital. El dispositivo de impresión lee el diseño y tiende sucesivas capas de líquido, polvo o material de láminas para construir un objeto de sección transversal en sección transversal. Estas capas se unen o fusionan de manera automática para crear el producto final, que puede tener casi cualquier forma geométrica. Los dispositivos de impresión difieren en los materiales que se utilizan y en la forma en que se depositan las capas para crear productos. Una aplicación es la fabricación de órganos y partes corporales a partir de capas

de células vivas que se depositan sobre un medio gelatinoso o matriz de azúcar y que se acumulan para formar estructuras tridimensionales. Las implantaciones de prótesis de cadera personalizadas ya son frecuentes. Edificios y hábitats espaciales están sobre las mesas de dibujo, de modo que esta tecnología no se restringe a cosas pequeñas. Las aplicaciones parecen ilimitadas. Espera el crecimiento fenomenal de la fabricación aditiva.

**PUNTO DE CONTROL**

¿Por qué es más fácil que un polluelo dentro de un cascarón salga de él, a que un pollo fuera del cascarón entre en él?

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Para entrar en el cascarón, un pollo que está afuera debe luchar con la compresión, que resiste enormemente el rompimiento del cascarón. Pero, cuando un polluelo sale desde el interior, sólo debe superar la tensión más débil del cascarón. Para ver que la compresión del cascarón exige mayor fuerza, trata de romper un huevo por su eje largo al oprimirlo entre el pulgar y los demás dedos. ¿Sorprendido? Inténtalo por su diámetro más corto. ¿Sorprendido? (Haz este experimento sobre un fregadero con algún tipo de protección, como guantes, para posibles esquirlas de cascarón.)

## 12.6 Escalamiento[1]

Galileo estudió el escalamiento y diferenció los tamaños de los huesos de diversas criaturas.

¿Alguna vez has notado cuán fuerte es una hormiga para su tamaño? Una hormiga puede transportar el peso de varias hormigas sobre su espalda, en tanto que un elefante fuerte tendría mucha dificultad para transportar incluso un solo elefante. ¿Cuán fuerte sería una hormiga si aumentara su escala al tamaño de un elefante? ¿Esta "súper hormiga" sería varias veces más fuerte que un elefante? Sorprendentemente, la respuesta es *no*. Tal hormiga no podría levantar su propio peso del suelo. Sus patas serían muy delgadas para su enorme peso y es probable que se rompieran.

Una esfera tiene la menor área por volumen. Ahora sabes por qué los depósitos de agua elevados con frecuencia son esféricos.

Hay una razón por la que las patas de la hormiga son delgadas y las patas del elefante son gruesas. A medida que el tamaño de una cosa aumenta, se vuelve más pesada mucho más rápido de lo que se vuelve más fuerte. Puedes sostener un palillo de dientes horizontalmente de sus extremos y observar que no se pandea. Pero sostén horizontalmente por sus extremos todo un tronco de árbol del mismo tipo de madera y observarás un pandeo considerable. En relación con su peso, el palillo de dientes es mucho más fuerte que el árbol. El **escalamiento** es el estudio de cómo el volumen y la forma (el tamaño) de cualquier objeto afecta las relaciones entre su fuerza, peso y área superficial.

La *fuerza* se relaciona con el área de la sección transversal (que es bidimensional y se mide en centímetros *cuadrados*), en tanto que el *peso* se relaciona con el volumen (que es tridimensional y se mide en centímetros *cúbicos*). Para entender esta relación

**VIDEO: Escalamiento**

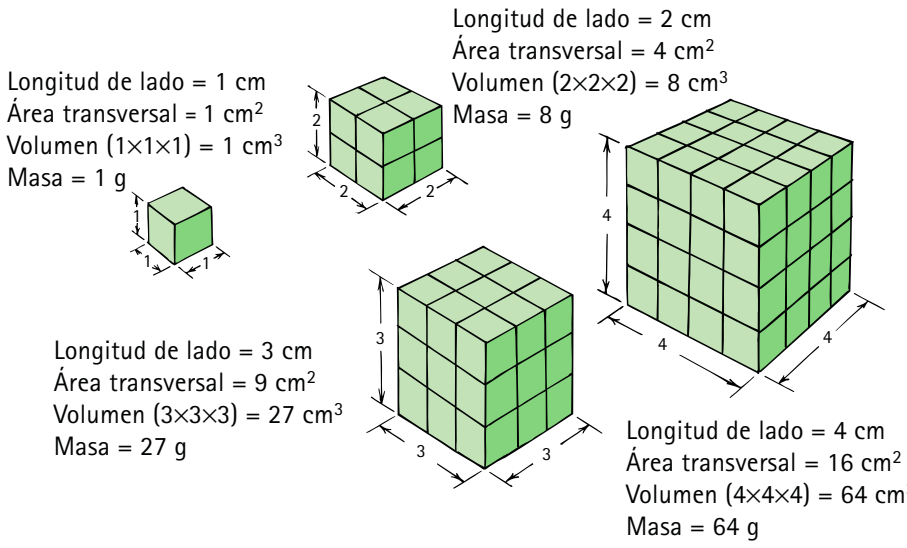



**FIGURA 12.16**
A medida que las dimensiones lineales de un objeto cambian por algún factor, el área transversal cambia por el cuadrado de este factor, y el volumen (y, por tanto, el peso) cambia por el cubo de este factor. Se observa que, cuando las dimensiones lineales se duplican (factor 2), el área crece por $2^2 = 4$ y el volumen crece por $2^3 = 8$.

[1]El material de esta sección se basa en dos sensacionales e informativos ensayos: "On Being the Right Size" de J. B. S. Haldane y "On Magnitude" de sir D'Arcy Wentworth Thompson, ambos en James R. Newman (ed.), *The World of Mathematics*, vol. II (New York: Simon & Schuster, 1956).

cuadrado-cubo, piensa en el caso más simple de un cubo sólido de materia, de 1 centímetro por lado; por decir, un pequeño cubo de azúcar. Cualquier cubo de 1 centímetro cúbico tiene una sección transversal de 1 centímetro cuadrado; esto es: si rebanas el cubo en sentido paralelo a una de sus caras, el área rebanada sería de 1 centímetro cuadrado. Compara esto con un cubo hecho del mismo material que tenga el doble de dimensiones lineales: un cubo de 2 centímetros por lado. Como se muestra en la Figura 12.16, su área transversal es $2 \times 2$, o 4 centímetros cuadrados, y su volumen es $2 \times 2 \times 2$, u 8 centímetros cuadrados. Por tanto, el cubo más grande es 4 veces más fuerte, pero 8 veces más pesado. Una revisión cuidadosa de la Figura 12.16 muestra que, para aumentos de dimensiones lineales, el área transversal y el área total crecen por el cuadrado del aumento, en tanto que el volumen y el peso crecen por el cubo del aumento.

El volumen (y, por tanto, el peso) aumenta mucho más rápido que el correspondiente aumento del área transversal. Aunque la Figura 12.16 demuestra el ejemplo simple de un cubo, el principio se aplica a un objeto de cualquier forma. Piensa en un jugador de fútbol que puede hacer muchas lagartijas. Supón que de algún modo pudiera aumentar su escala al doble de su tamaño; esto es: el doble de alto y el doble de ancho, con sus huesos al doble de grueso y cada dimensión lineal aumentada por un factor de 2. ¿Sería el doble de fuerte y podría levantarse con el doble de facilidad? La respuesta es *no*. Aunque sus brazos del doble de grueso tendrían 4 veces el área transversal y serían 4 veces más fuertes, él sería 8 veces más pesado. Con un esfuerzo similar, podría levantar sólo la mitad de su peso. Con este aumento de peso, sería más débil que antes.

En la naturaleza se observa que los animales grandes tienen patas desproporcionadamente gruesas comparadas con las de los animales pequeños. Esto se debe a la relación entre el volumen y el área: el hecho de que el volumen (y el peso) crecen por el cubo del factor por el cual aumenta la dimensión lineal, en tanto que la fuerza (y el área) crecen por el cuadrado del factor de aumento. Así que puedes ver que hay una razón por la que un ciervo o un antílope tienen las patas delgadas, así como un rinoceronte, un hipopótamo o un elefante tienen las patas gruesas. Es interesante que la necesidad de las criaturas grandes de tener patas gruesas la sortean muy bien las ballenas, pues la flotabilidad del agua les proporciona sostén. Incluso los hipopótamos pasan gran parte de su tiempo en el agua.

Conocer sobre el escalamiento te permite saber que uno no puede tomarse en serio la gran fuerza atribuida a King Kong y a otros gigantes ficticios. El hecho de que las consecuencias del escalamiento se ignoren convenientemente es una de las diferencias entre la ciencia y la ciencia ficción.

También es importante comparar el área superficial total con el volumen (Figura 12.18). El área superficial total, tal como el área transversal, crecen en proporción al cuadrado de las dimensiones lineales de un objeto, en tanto que el volumen crece en proporción al cubo de las dimensiones lineales. De modo que, a medida que un objeto

**FIGURA 12.17**
Sillas con aumento de escala en el Exploratorium, cada una con el doble de tamaño.

**VIDEO: Área superficial contra volumen**

**pti**

- Leonardo da Vinci fue el primero en señalar que el área transversal de un tronco de árbol es igual a las áreas superficiales combinadas producidas al hacer un corte horizontal por todas las ramas más arriba del árbol (pero perpendicular a cada rama). Lo mismo sucede con las áreas transversales de los capilares con la sección transversal de la vena que les suministra sangre.

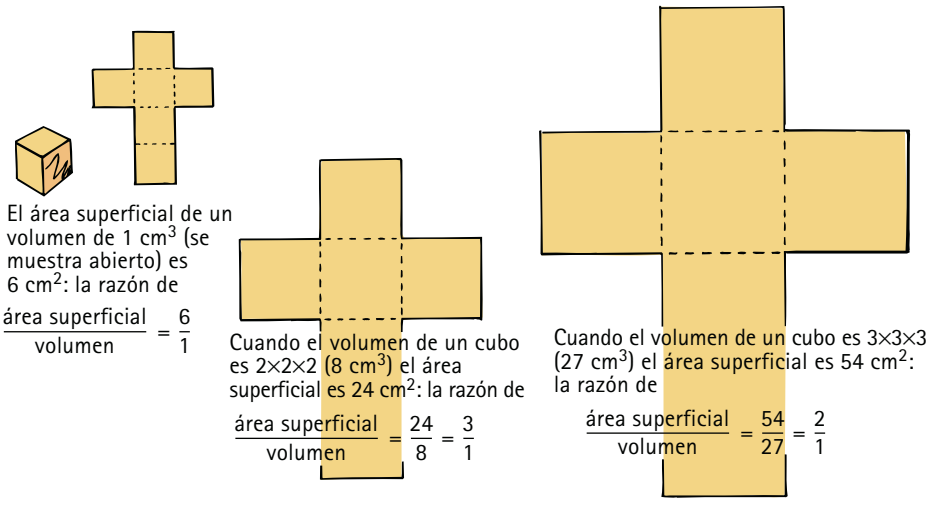



**FIGURA 12.18**
A medida que el tamaño de un objeto aumenta, hay un mayor aumento de su volumen que de su área superficial; como resultado, la razón del área superficial con respecto al volumen disminuye.

**SCREENCAST:**
**Escalamiento 1**

**SCREENCAST:**
**Escalamiento 2**

**SCREENCAST:**
**Escalamiento 3**

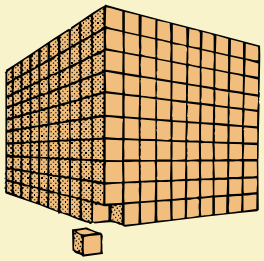
crece, su área superficial y su volumen crecen a diferentes tasas, con el resultado de que la razón del área superficial con respecto al volumen *disminuye*. En otras palabras, tanto el área superficial como el volumen de un objeto que crece aumentan, pero el crecimiento del área superficial *en relación con* el crecimiento del volumen disminuye. No muchas personas entienden realmente este concepto. Los siguientes ejemplos pueden ser útiles.

Un chef sabe que si pela 5 kg de patatas pequeñas saldrán más cáscaras que si pela 5 kg de patatas grandes. Los objetos más pequeños tienen más área superficial por kilogramo. Las patatas a la francesa se cocinan más rápidamente en aceite que las patatas más gruesas. Las hamburguesas aplanadas se cocinan más rápido que las albóndigas de la misma masa. El hielo triturado enfría una bebida mucho más rápido que un solo cubo de hielo de la misma masa, porque el hielo triturado presenta más área superficial a la bebida. La esponja de acero se oxida en el fregadero en tanto que los cuchillos de acero se oxidan más lentamente. El hierro se oxida cuando se expone al aire, pero se oxida mucho más rápido, y pronto se carcome, si está en forma de pequeñas hebras o filamentos.

La combustión es una interacción entre las moléculas de oxígeno que están en el aire y las moléculas que están en la superficie del combustible. Es por eso que los trozos de carbón arden en tanto que el polvo de carbón explota cuando se enciende, y es por eso que se encienden fogatas con muchos pedazos delgados de madera y no con la misma masa de madera en un solo tronco. Todo esto es consecuencia de que el volumen y el área no están en proporción directa uno con otra.

## PUNTO DE CONTROL

1. **Considera un cubo de 1 $cm^3$ aumentado hasta la escala de un cubo de 10 cm de largo en cada arista.**
   a. **¿Cuál es el volumen del cubo a mayor escala?**
   b. **¿Cuál es su área superficial transversal?**
   c. **¿Cuál es su área superficial total?**
2. **Si de alguna forma pudieras aumentar tu escala al doble de tu tamaño al tiempo que conservas tus proporciones actuales, ¿serías más fuerte o más débil? Explica tu razonamiento.**



### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. a. El volumen del cubo a mayor escala es $(10\ cm)^3$ o $1{,}000\ cm^3$.
   b. Su área superficial transversal es $(10\ cm)^2$ o $100\ cm^2$.
   c. Su área superficial total = 6 lados × área de un lado = $6 \times (10\ cm)^2 = 600\ cm^2$.
2. Tu yo aumentado en escala sería 4 veces más fuerte porque el área transversal de tus huesos y músculos el doble de gruesos aumentaría por 4. Podrías levantar una carga 4 veces más pesada. Pero tu peso sería 8 veces mayor que antes, de modo que no serías más fuerte en relación con tu mayor peso. Tendrías 4 veces la fuerza pero levantarías 8 veces el peso, lo que te da una razón de la fuerza con respecto al peso de sólo la mitad de su valor anterior. De modo que, si apenas puedes levantar tu propio peso ahora, cuando aumentes de escala sólo podrías levantar la mitad de tu nuevo peso. Tu fuerza aumentaría, pero tu razón fuerza respecto del peso disminuiría. ¡Quédate como estás!

**FIGURA 12.19**
El elefante africano tiene menos área superficial en relación con su peso que muchos otros animales. Esto lo compensa con sus grandes orejas, que aumentan significativamente su área superficial radiante y facilitan el enfriamiento del cuerpo.

Las grandes orejas de los elefantes africanos es una manera como la naturaleza compensa la pequeña razón del área superficial con respecto al volumen en estas grandes criaturas. Las grandes orejas pueden mejorar la audición pero, mejor aún, aumentan el enfriamiento. La tasa a la que una criatura genera calor es proporcional a su masa (o volumen), pero el calor que puede disipar es proporcional a su área superficial. Si un elefante africano no tuviera grandes orejas, no tendría suficiente área superficial para enfriar su enorme masa. Las orejas grandes aumentan enormemente su área superficial total, lo que facilita el enfriamiento en los climas calurosos.

A nivel microscópico, las células vivas deben lidiar con el hecho de que el crecimiento de volumen es más rápido que el crecimiento del área superficial. Las células obtienen nutrientes mediante difusión a través de sus superficies. A medida que las células crecen, su área superficial aumenta, pero no tan rápido como para seguir el ritmo de crecimiento de su volumen. Por ejemplo, si el área superficial aumenta por 4, el volumen correspondiente aumenta por 8. Ocho veces más masa debe sostenerse sólo con 4 veces más nutrientes. En algún tamaño, el área superficial no es tan grande como para permitir que pasen nutrientes suficientes hacia la célula, lo que impone un límite a qué tan grande puede crecer la célula. De modo que las células se dividen y hay vida como se le conoce. Eso es bueno.

No tan bueno es el destino de los grandes animales cuando caen. El dicho "mientras más grandes son, más fuerte caen" es cierto y es consecuencia de la pequeña razón del área superficial con respecto al peso. La resistencia del aire al movimiento a través de éste depende del área superficial del objeto en movimiento. Si caes desde un risco, incluso con resistencia del aire, tu rapidez aumentaría a la tasa muy cercana de 1 *g*. Tu rapidez terminal (la rapidez a la cual la fuerza de la resistencia del aire sobre ti es igual a tu peso) sería grande a menos que usaras un paracaídas que aumentara tu área superficial. Los animales pequeños no necesitan paracaídas.

Observa cómo el escalamiento afecta a las criaturas pequeñas. Si tus dimensiones lineales se hacen más pequeñas por un factor de 10, tu área disminuiría por un factor de 100, pero tu peso disminuiría por 1,000. Ser tan pequeño significa que tendrías 10 veces más área superficial en relación con tu peso, de modo que tendrías una rapidez terminal mucho menor. Es por esto que un insecto puede caer desde la copa de un árbol hasta el suelo sin lastimarse. La razón del área superficial con respecto al peso está en favor del insecto; en cierto sentido, el insecto es su propio paracaídas.

Las disímiles consecuencias de una caída son sólo una ilustración de las diferentes relaciones que los organismos grandes y pequeños tienen con el ambiente físico. La fuerza de gravedad es pequeña para los insectos en comparación con las fuerzas de cohesión (adhesividad) entre sus pies y las superficies sobre las que caminan. Es por eso que una mosca puede trepar por una pared o caminar en el techo ignorando por completo la gravedad. Los seres humanos y los elefantes no pueden hacer eso. Las vidas de las criaturas pequeñas están regidas no por la gravedad, sino por fuerzas como la tensión superficial, la cohesión y la capilaridad, que se abordarán en el siguiente capítulo.

Es interesante observar que el ritmo cardiaco de un mamífero guarda relación con el tamaño del mamífero. El corazón de una pequeña musaraña late aproximadamente 20 veces más rápido que el corazón de un elefante. En general, los mamíferos pequeños viven rápido y mueren jóvenes; los animales más grandes viven a ritmo pausado y viven más tiempo. No te sientas mal por un hámster que no viva tanto como un perro. Todos los animales de sangre caliente tienen aproximadamente el mismo lapso de vida, no en términos de años, sino en el número promedio de latidos cardiacos (alrededor de 800 millones). Los seres humanos son la excepción: viven de dos a tres veces más que otros mamíferos de su tamaño.

Los investigadores descubrieron que, cuando algo se encoge lo suficiente (ya sea un circuito integrado, un motor, una película de lubricante, o un metal individual o un cristal cerámico) deja de actuar como una versión miniatura de su naturaleza más grande y comienza a comportarse en formas nuevas y diferentes. El metal paladio, por ejemplo, que por lo general está compuesto de granos de más o menos 1,000 nanómetros de tamaño, es cinco veces más fuerte cuando se forma con granos de 5 nanómetros.[2] El escalamiento es enormemente importante a medida que más dispositivos se miniaturizan. La nanotecnología funciona en la frontera entre la física, la química, la biología y la ingeniería, y es una frontera donde hay muchos resultados potenciales que todavía no pueden vislumbrarse.

**FIGURA 12.20**
La larga cola del mono no sólo lo ayuda a mantener su equilibrio, sino también a radiar de manera efectiva el exceso de calor.

Las gotas de lluvia grandes caen más rápido que las gotas pequeñas, y los peces grandes nadan más rápido que los peces pequeños.

**pti**

- Las gotas de lluvia pueden tener hasta 8 mm de diámetro. Las gotas de alrededor de 1 mm de diámetro son esféricas; a los 2 mm, se aplanan como una hamburguesa; y a los 5 mm, la resistencia del aire las distorsiona a formas de paracaídas. Cuando la circulación lanza las gotas de lluvia de vuelta al aire, con frecuencia repetidamente, pueden congelarse y formar granizo. Se han registrado granizos que tienen hasta 178 mm de diámetro.

[2]Un nanómetro es una mil millonésima de metro, de modo que 1,000 nanómetros son una millonésima de metro, o una milésima de milímetro. ¡De veras pequeño!

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Enlace atómico.** Unión de átomos que forman estructuras más grandes, incluidos los sólidos.

**Densidad.** La masa de una sustancia por unidad de volumen:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

La *densidad de peso* o *peso específico* es el peso por unidad de volumen:

$$\text{Densidad de peso} = \frac{\text{peso}}{\text{volumen}}$$

**Elasticidad.** Propiedad de un material mediante la cual éste cambia de forma cuando una fuerza deformadora actúa sobre él y regresa a su forma original cuando se retira la fuerza.

**Ley de Hooke.** La cantidad de estiramiento o compresión de un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada: $F \sim \Delta x$. Cuando se introduce la constante de resorte $k$, $F = k\Delta x$.

**Escalamiento.** El estudio de cómo el tamaño afecta las relaciones entre el peso, la fuerza y el área superficial.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 12.1 Estructura cristalina

1. ¿De qué manera el arreglo de los átomos de una sustancia cristalina difiere del arreglo de una sustancia no cristalina?
2. ¿Qué evidencia puedes citar para la naturaleza cristalina microscópica de ciertos sólidos? ¿Para la naturaleza cristalina macroscópica?

### 12.2 Densidad

3. ¿Qué sucede con el volumen de una rebanada de pan que se oprime? ¿La masa? ¿La densidad?
4. ¿Qué es más denso: un objeto que tiene una densidad de 1,000 kg/m$^3$ o uno que tiene una densidad de 1 g/cm$^3$?
5. El iridio no es el átomo más pesado que se encuentra en la naturaleza. Entonces, ¿qué explica que un trozo de iridio puro sea la *sustancia* más densa sobre la Tierra?
6. ¿Cuál es la densidad de masa del agua? ¿Cuál es la densidad de peso del agua?

### 12.3 Elasticidad

7. ¿Por qué se dice que un resorte es elástico?
8. ¿Por qué se dice que un trozo de arcilla es inelástico?
9. ¿Cuál es la ley de Hooke? ¿Se aplica a materiales elásticos o a materiales inelásticos?
10. ¿Qué se entiende por el límite elástico de un objeto particular?
11. Si un objeto de 1 kg estira un resorte 2 cm, ¿cuánto se estirará el resorte cuando sostenga un objeto de 3 kg? (Supón que el resorte no llega a su límite elástico.)

### 12.4 Tensión y compresión

12. Distingue entre tensión y compresión.
13. ¿Qué es y dónde está la capa neutra en una viga que soporta una carga?
14. ¿Por qué las secciones transversales de las vigas metálicas tienen forma de letra I en lugar de rectángulos sólidos?

### 12.5 Arcos

15. ¿Por qué se necesitaron tantas columnas verticales para soportar los techos de los edificios de piedra en los antiguos Egipto y Grecia?
16. ¿Es la tensión o la compresión lo que fortalece un arco que soporta una carga?
17. ¿Por qué no se necesita cemento entre los bloques de piedra de un arco que tiene la forma de una catenaria invertida?
18. ¿Por qué no se necesitan columnas verticales para sostener el punto medio de los estadios de domo, como el Astrodome de Houston?

### 12.6 Escalamiento

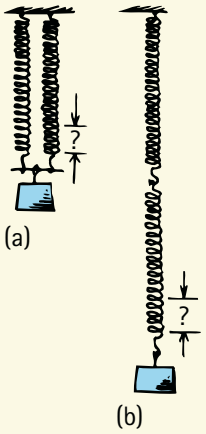
19. ¿La fuerza del brazo de una persona por lo general depende de la longitud del brazo o de su área transversal?
20. ¿Cuál es el volumen de un cubo de azúcar que mide 1 cm por lado? ¿Cuál es el área transversal del cubo? ¿El área superficial total?
21. Si las dimensiones lineales de un objeto se duplican, ¿en cuánto aumenta el área superficial? ¿En cuánto aumenta el volumen?
22. ¿Qué tiene más piel: un elefante o un ratón? ¿Qué tiene más piel *por unidad de peso corporal*: un elefante o un ratón?
23. ¿Qué necesita más alimento por peso corporal diariamente: un elefante o un ratón?
24. El dicho “mientras más altos son, más fuerte caen”, ¿es consecuencia de una razón pequeña o grande de área superficial con respecto al volumen?
25. ¿Por qué las criaturas pequeñas pueden caer distancias considerables sin lesionarse, en tanto que las personas necesitan paracaídas para hacer lo mismo?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

26. Si vives en una región donde cae nieve, recolecta algunos copos de nieve sobre ropa negra y examínalos con una lupa. ¡Tendrás que hacer esto rápidamente! Verás que las muchas estructuras cristalinas hexagonales están entre los más hermosos espectáculos de la naturaleza.
27. Simula un empaquetamiento atómico con más o menos un par de docenas de monedas. Ordénalas en un patrón cuadrado de modo que cada moneda dentro del perímetro tenga contacto con otras cuatro. Luego ordénalas hexagonalmente, de modo que cada una esté en contacto con otras seis. Compara las áreas ocupadas por el mismo número de monedas estrechamente empaquetadas en ambas formas.
28. ¿Eres un poco más alto cuando estás acostado que cuando estás de pie? Realiza mediciones y observa.
29. Sostén un huevo verticalmente y cuelga una pequeña cadena alrededor de él. ¿Puedes ver que la cadena sigue el contorno del huevo: pandeo ligero para el extremo más redondeado y pandeo más profundo para el extremo más puntiagudo? ¡La naturaleza no pasó por alto la catenaria!

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

30. Demuestra que la densidad de un cilindro sólido de 5 kg, que tiene 10 cm de alto y 3 cm de radio, es 17.7 g/cm$^3$.
31. ¿Cuál es el peso de un metro cúbico de corcho? ¿Podrías levantarlo? (Usa 400 kg/m$^3$ para la densidad del corcho.)
32. Un resorte determinado se estira 6 cm cuando de él se suspende una carga de 30 N. ¿Cuánto se estirará el resorte si de él se suspenden 50 N (y no llega a su límite elástico)?
33. Otro resorte se estira 4 cm cuando de él se suspende una carga de 10 N. ¿Cuánto se estirará el resorte si un resorte idéntico también soporta la carga como se muestra en (a) y (b)? (Desprecia los pesos de los resortes.)




34. Un cubo de 2 cm de lado se corta en cubos de 1 cm de lado.
    a. ¿Cuántos cubos resultan?
    b. ¿Cuál era el área superficial del cubo original y cuál es el área superficial total de los ocho cubos más pequeños? ¿Cuál es la razón de las áreas superficiales?
    c. Demuestra que la razón de la superficie con respecto al volumen del cubo más pequeño es el doble de grande que para el cubo individual de mayor tamaño.
35. Una masa de oro de 19.3 g con forma de cubo mide 1 cm de largo por cada lado (un poco menor que un cubo de azúcar). ¿Cuál sería la longitud de los lados de un cubo que tiene el doble de esta masa de oro?
36. En 2009, uno de los paquetes de rescate del gobierno estadounidense fue de US$700 mil millones cuando el oro valía US$800 por onza (US$28.40 por gramo). Calcula la masa en gramos de US$700 mil millones de oro. Si esta cantidad de oro tuviera la forma de un cubo, ¿cuánto mediría cada uno de sus lados?

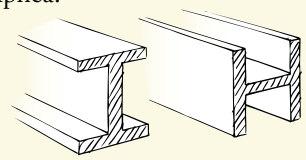
## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

37. Consulta la Tabla 12.1 y clasifica las densidades de los siguientes materiales de mayor a menor:
    a. Agua líquida
    b. Hielo
    c. Aluminio
38. Considera estos tres animales: A. perro, B. caballo y C. elefante. Clasifícalos, de mayor a menor, por sus
    a. áreas superficiales.
    b. masas.
    c. pesos.
    d. volúmenes.
    e. áreas superficiales por peso.

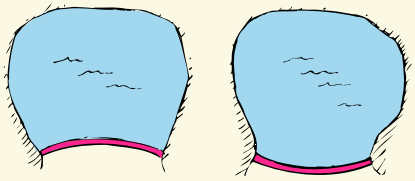
## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

39. Tomas 1,000 mg de una vitamina y tu amigo toma 1 g de la misma vitamina. ¿Quién toma más vitamina?
40. Tu amigo dice que la principal diferencia entre un sólido y un líquido es el tipo de átomos del material. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo, y por qué?
41. ¿En qué sentido puedes decir que un árbol es aire solidificado?
42. El silicio es el principal ingrediente tanto del vidrio como de los dispositivos semiconductores, aunque las propiedades físicas del vidrio son diferentes de las de los dispositivos semiconductores. Explica.
43. ¿Qué evidencia puedes citar para respaldar la afirmación de que los cristales están compuestos de átomos que están ordenados en patrones específicos?
44. ¿Qué sucede con la densidad del aire en un globo de plástico común cuando se calienta?
45. Compara la densidad de un bloque de hierro de 100 kg con la densidad de una limadura de hierro.
46. ¿Qué ocurre con la densidad del agua cuando se congela hasta volverse hielo?
47. En una inmersión profunda, una ballena es considerablemente comprimida por la presión del agua circundante. ¿Qué ocurre con la densidad de la ballena durante la inmersión?
48. ¿Cuál tiene más volumen: un kilogramo de oro o un kilogramo de aluminio?
49. ¿Cuál tiene más masa: un litro de hielo o un litro de agua?
50. ¿Cómo pondrías a prueba la noción de que una bola de acero es elástica?
51. ¿Por qué el resorte suspendido se estira más en la parte superior que en la inferior?

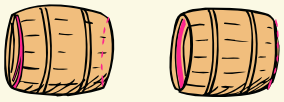
52. Si el resorte del dibujo anterior sostuviera un peso pesado, ¿cómo cambiaría el estiramiento?
53. Cuando doblas un metro, un lado está bajo tensión y el otro está bajo compresión. ¿Cuál lado es cuál?
54. Tensión y compresión ocurren en una viga horizontal parcialmente sostenida cuando se pandea debido a la gravedad o cuando soporta una carga. Haz un dibujo simple que muestre un medio para sostener la viga de modo que la tensión ocurra en la parte superior y la compresión en la parte inferior. Dibuja otro caso en el que la compresión esté en la parte superior y la tensión ocurra en la parte inferior.
55. Supón que construyes un balcón que se extiende fuera del marco principal de tu casa. En una losa sobresaliente de concreto, ¿las barras reforzadoras de acero deben incrustarse en la parte superior, en medio o en la parte inferior de la losa?
56. ¿Una viga I horizontal puede soportar mayor carga cuando el alma es horizontal o cuando el alma es vertical? Explica.



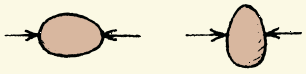
57. Los dibujos son vistas superiores de un dique para contener un lago. ¿Cuál de los dos diseños es preferible? ¿Por qué?



58. Los extremos "planos" de un barril de madera muy grande para almacenar vino, ¿deben ser cóncavos (doblados hacia adentro) o convexos (doblados hacia afuera)? ¿Por qué?



59. Considera dos puentes que sean réplicas exactas uno de otro, excepto que cada dimensión del puente más grande sea exactamente el doble del otro; esto es: doble de largo, elementos estructurales con el doble de grueso, etc. ¿Cuál puente tiene más probabilidad de colapsar bajo su propio peso?
60. Sólo con gran dificultad puedes romper un huevo cuando lo oprimes a lo largo de su eje mayor, pero lo rompes fácilmente si lo oprimes por los lados. ¿Por qué?



61. Archie diseña un arco con cierto ancho y altura para que funcione como escultura exterior en un parque. Para lograr el tamaño y la forma del arco más fuerte posible, suspende una cadena de dos soportes igualmente elevados tan separados como el ancho del arco y permite que la cadena cuelgue tan bajo como el alto del arco. Luego diseña el arco para que tenga exactamente la forma invertida de la cadena colgante. Explica por qué.

62. La fotografía muestra un arco semicircular de piedra. Observa que debe mantenerse unido con barras de acero para evitar movimiento hacia afuera. Si la forma del arco no fuera un semicírculo, sino la forma que usó Archie en el ejercicio previo, ¿serían necesarias las barras de acero? Explica.

63. Un dulcero que produce manzanas caramelizadas decide usar 100 kg de manzanas grandes en lugar de 100 kg de manzanas pequeñas. ¿El dulcero necesitará producir más o menos caramelo para cubrir las manzanas?
64. ¿Por qué es más fácil encender un fuego con astillas en lugar de con grandes varas y troncos del mismo tipo de madera?
65. ¿Por qué un trozo de carbón arde cuando se enciende, en tanto que el polvo de carbón explota?
66. ¿Por qué una casa de dos pisos que es aproximadamente un cubo sufre menos pérdida de calor que una casa de un piso, llena de recovecos, del mismo volumen?
67. ¿Por qué la calefacción es más eficiente en los grandes edificios de departamentos que en las residencias unifamiliares?
68. Algunas personas con conciencia ambiental construyen sus casas con forma de domo. ¿Por qué hay menos pérdida de calor en una residencia con forma de domo que en una residencia convencional con el mismo volumen?
69. A medida que el volumen de un objeto aumenta, su área superficial también aumenta. Durante este incremento, ¿la *razón* de los metros cuadrados con respecto a los metros cúbicos aumenta o disminuye?
70. ¿Por qué el hielo triturado se funde más rápido que la misma masa de cubos de hielo?
71. ¿Por qué algunos animales se hacen un ovillo cuando tienen frío?
72. ¿Por qué el óxido es un gran problema para las barras de hierro delgadas que para los pilares de hierro gruesos?
73. ¿Por qué las patatas fritas delgadas se cocinan más rápido que las patatas fritas gruesas?
74. Si asas hamburguesas y te impacientas, ¿por qué es buena idea aplanar las hamburguesas para hacerlas más anchas y más delgadas?
75. ¿Por qué los mitones son más calientes que los guantes en un día frío? ¿Y qué partes el cuerpo son más susceptibles a la congelación? ¿Por qué?
76. Un ratón tiene más piel por peso corporal que un elefante. ¿Cómo afecta esto a la cantidad de alimento que come cada criatura?
77. Tanto un gorila como un ratón por error caen de un risco de la misma altura. ¿Cómo es que el escalamiento ayuda al ratón, pero no al gorila?
78. ¿Cómo se relaciona el escalamiento con el hecho de que el ritmo cardiaco de las criaturas grandes por lo general es más lento que el ritmo cardiaco de las criaturas más pequeñas?
79. Los pulmones humanos tienen un volumen de sólo aproximadamente 4 L, aunque tienen un área superficial interna de casi 100 $m^2$. ¿Por qué esto es importante y cómo es posible?
80. ¿Qué tiene que ver el concepto de escalamiento con el hecho de que las células vivas de una ballena tengan aproximadamente el mismo tamaño que las de un ratón?
81. ¿Cuáles caen más rápido: las gotas de lluvia grandes o las pequeñas?

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

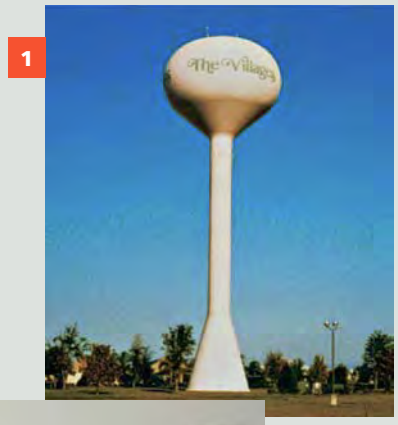
82. ¿El hierro necesariamente es más pesado que el corcho? Explica.
83. El átomo de uranio es el más pesado y más masivo entre los elementos que ocurren de manera natural. ¿Por qué entonces una barra sólida de uranio no es el metal más denso?
84. ¿Por qué crees que las vigas con tanta frecuencia se acomodan para formar triángulos en la construcción de puentes y otras estructuras? (Compara la estabilidad de tres varas clavadas para formar un triángulo con cuatro varas clavadas para formar un rectángulo, o cualquier número de varas para formar figuras geométricas de múltiples lados. ¡Pruébalo y observa!)
85. Una soga gruesa es más fuerte que una soga delgada del mismo material. ¿Una soga larga es más fuerte que una soga corta?
86. Si usas una cantidad específica de masa para *cupcakes* y los horneas durante el tiempo sugerido para un pastel, ¿cuál será el resultado?
87. La nutrición se obtiene de los alimentos a través del área superficial interior de los intestinos. ¿Por qué un pequeño organismo, como un gusano, tiene un tubo digestivo simple y relativamente recto, en tanto que un organismo grande, como un ser humano, tiene un tubo digestivo complejo y ampliamente plegado?
88. ¿Cuál es la ventaja de que un gimnasta tenga baja estatura?
89. ¿Quién tiene más necesidad de beber en un clima desértico seco: un niño o un adulto?
90. ¿Por qué un colibrí no se eleva como un águila y un águila no bate sus alas como un colibrí?
91. ¿Puedes relacionar la idea del escalamiento con el gobierno de grupos pequeños frente a grupos grandes de ciudadanos? Explica.

# 13

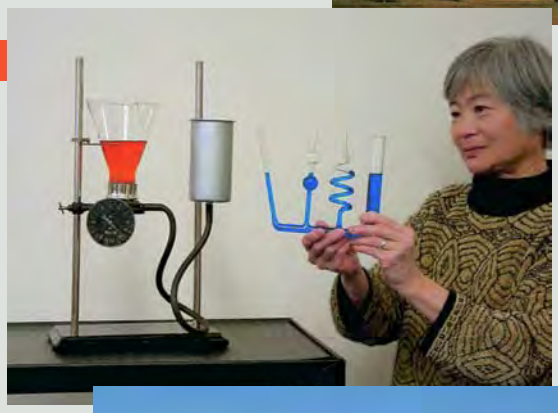
## CAPÍTULO 13

# Líquidos


13.1 Presión
13.2 Presión de un líquido
13.3 Flotabilidad
13.4 Principio de Arquímedes
13.5 ¿Qué hace que un objeto se hunda o flote?
13.6 Flotación
13.7 Principio de Pascal
13.8 Tensión superficial
13.9 Capilaridad


1



2

3

4

**1** La profundidad del agua por arriba del nivel del suelo en la torre garantiza una presión de agua importante y confiable a las muchas viviendas que atiende. **2** Cuando les muestra los vasos de Pascal, Tsing Bardin pregunta a sus alumnos cuál es la relación entre los mismos niveles de agua coloreada y el dicho de que "las aguas buscan su nivel". **3** La Falkirk Wheel de Escocia levanta botes 18 m con facilidad desde un cuerpo de agua más bajo hasta uno más alto. Mientras una góndola llena de agua gira hacia arriba, la otra gira hacia abajo, siempre en equilibrio sin importar el peso de los botes que pueda o no transportar. **4** El autor del libro de texto de física, Ray Serway, juega con la tensión superficial.

Blaise Pascal fue un destacado científico, escritor y teólogo del siglo XVII. Mientras investigaba la física de los fluidos, inventó la prensa hidráulica, que utiliza presión hidráulica para multiplicar una fuerza. También inventó la jeringa. La notoriedad de Pascal creció por su comentario acerca de la experimentación con barómetros realizada por Evangelista Torricelli. Pascal cuestionó qué fuerza mantenía al mercurio en el tubo y qué llenaba el espacio encima del mercurio en el tubo. La mayoría de los científicos de la época, en el espíritu de Aristóteles, no creían que fuera posible un vacío y pensaban que alguna materia invisible estaba presente en el "espacio vacío". Pascal realizó nuevos experimentos y sostuvo que, en efecto, un cuasivacío ocupaba el espacio encima de la columna de líquido del tubo del barómetro.

Pascal, quien tuvo mala salud toda su vida, convenció a su cuñado de transportar un barómetro por la pendiente de una alta montaña para investigar el efecto que tenía sobre el nivel del mercurio del tubo. Como Pascal hipotetizó, el nivel de mercurio descendió con el aumento de altitud. Pascal realizó una versión más modesta del experimento y llevó un barómetro a lo alto del campanario de una iglesia, a una altura aproximada de 50 metros. De nuevo, el nivel de mercurio descendió, pero no tanto. Éste y otros experimentos de Pascal fueron elogiados en toda Europa, pues establecían el principio y el valor del barómetro.

Para responder a los argumentos de que tenía que haber alguna materia invisible en el espacio vacío, Pascal apeló al método científico y respondió: "Para demostrar que una hipótesis es evidente, no es suficiente con que todos los fenómenos se desprendan de ella; más bien, si conduce a algo que contradice a uno solo de los fenómenos, eso es suficiente para establecer su falsedad". Su insistencia en la existencia del vacío también creó conflicto con otros prominentes científicos, como Descartes.

El trabajo de Pascal con la hidráulica lo condujo a lo que ahora se denomina el principio de Pascal, es decir, un cambio de presión en cualquier punto de un fluido encerrado en reposo se transmite sin disminución a todos los puntos del fluido. Sogas y poleas cedieron su lugar a este principio, pues los dispositivos hidráulicos multiplican fuerzas inimaginables antes de la época de Pascal.

Aunque teólogo devoto, Pascal discrepaba de algunos de los dogmas de la época. Algunos de sus escritos sobre religión fueron prohibidos por la Iglesia. Como científico, es recordado por la hidráulica que luego cambió el panorama tecnológico; como teólogo, es recordado por sus muchas aseveraciones, una de las cuales guarda relación con siglos de humanidad: "Los hombres nunca hacen el mal tan completa y alegremente como cuando lo hacen por convicciones religiosas".

En la actualidad, en honor a sus aportaciones científicas, el nombre de Pascal se asignó a la unidad del SI de presión y a un lenguaje de programación de computadoras. En la literatura, Pascal es considerado uno de los autores más importantes de mediados del siglo XVII. Su uso de la sátira y la sabiduría popular ha influido a escritores de todo el mundo.

## 13.1 Presión

Un líquido contenido en un recipiente ejerce fuerzas contra las paredes del recipiente. Para estudiar la interacción entre el líquido y las paredes, es conveniente introducir el concepto de presión. La **presión** es una fuerza dividida entre el área sobre la que se ejerce la fuerza:[1]

$$\text{Presión} = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}}$$

Para ilustrar la diferencia entre presión y fuerza, observa los dos bloques de la Figura 13.1. Los bloques son idénticos, pero uno está de pie sobre su extremo y el otro descansa sobre su costado. Ambos bloques tienen igual peso y, por tanto, ejercen la misma fuerza sobre la superficie (cada uno registraría lo mismo sobre una báscula de

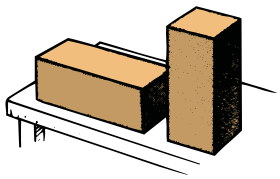


**FIGURA 13.1**
Si bien el peso de ambos bloques es el mismo, el bloque erguido ejerce mayor presión contra la mesa.

[1]La presión puede medirse en cualquier unidad de fuerza dividida entre cualquier unidad de área. La unidad de presión estándar internacional (SI), el newton por metro cuadrado, se denomina pascal (Pa). Una presión de 1 Pa es muy pequeña y aproximadamente igual a la presión ejercida por un billete de dólar que descansa plano sobre una mesa. Los escritos científicos usan con más frecuencia el kilopascal (1 kPa = 1,000 Pa).

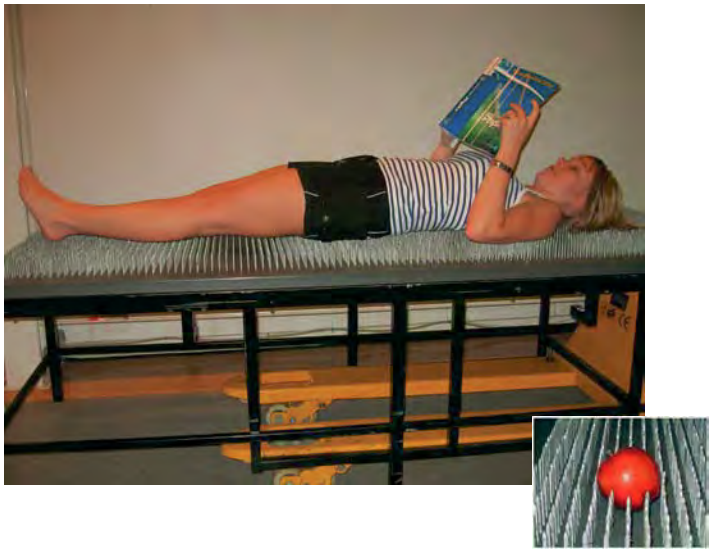


**FIGURA 13.2**
La física Sarah Blomberg yace sobre la cama de clavos sin sufrir daño porque su peso se distribuye sobre cientos de clavos, lo que hace que la presión en la punta de cada clavo sea pequeña y no plantee peligro. La foto del recuadro muestra la manzana que se ha dejado caer y da testimonio de lo afilado de los clavos.

baño), pero el bloque erguido ejerce mayor *presión* contra la superficie. Si el bloque se inclinara de modo que su contacto con la mesa fuese sobre una sola esquina, la presión sería todavía mayor.

## 13.2 Presión de un líquido

**SCREENCAST: Presión de un líquido**

Cuando nadas bajo el agua, puedes sentir la presión del agua que actúa contra tus tímpanos. Cuanto más profundo nadas, mayor es la presión. La presión que sientes se debe al peso del agua sobre ti. A medida que nadas a mayor profundidad, hay más agua arriba de ti y, por tanto, mayor presión. La presión que ejerce un líquido depende de su profundidad.

La presión de un líquido también depende de la densidad del líquido. Si te sumergieras en un líquido más denso que el agua, la presión sería proporcionalmente mayor. La presión debida a un líquido es precisamente igual al producto de la densidad de peso y la profundidad:[2]

$$\text{Presión del líquido} = \text{densidad de peso} \times \text{profundidad}$$

Dicho de una manera sencilla: la presión que un líquido ejerce contra los lados y el fondo de un recipiente dependen de la densidad y la profundidad del líquido. Si desprecias la presión atmosférica, al doble de profundidad, la presión del líquido contra el fondo es del doble; a tres veces la profundidad, la presión del líquido es del triple; y así

**pti**

- Las moléculas que constituyen un líquido pueden fluir al deslizarse unas sobre otras. Un líquido adopta la forma de su recipiente. Sus moléculas están muy juntas y resisten muy bien las fuerzas compresivas, de modo que los líquidos, al igual que los sólidos, son difíciles de comprimir.

[2]Esta ecuación se deriva de las definiciones de presión y densidad de peso. Considera un área en el fondo de un recipiente de líquido. El peso de la columna de líquido directamente encima de esta área produce presión. De acuerdo con la definición,

$$\text{Densidad de peso} = \frac{\text{peso}}{\text{volumen}}$$

puedes expresar este peso de líquido como

$$\text{Peso} = \text{densidad de peso} \times \text{volumen},$$

donde el volumen de la columna es simplemente el área multiplicada por la profundidad. Entonces se obtiene:

$$\text{Presión} = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}} = \frac{\text{peso}}{\text{área}} = \frac{\text{densidad de peso} \times \text{volumen}}{\text{área}} = \frac{\text{densidad de peso} \times \left(\cancel{\text{área}} \times \text{profundidad}\right)}{\cancel{\text{área}}}$$
$$= \text{densidad de peso} \times \text{profundidad}$$

Para la presión total, a esta ecuación se le agrega la presión debida a la atmósfera sobre la superficie del líquido.

sucesivamente. O, si el líquido es dos o tres veces más denso, la presión del líquido es respectivamente dos o tres veces mayor para cualquier profundidad dada. Los líquidos son prácticamente incompresibles; es decir, es muy difícil que su volumen cambie con la presión (el volumen del agua disminuye sólo 50 millonésimas de su volumen original por cada atmósfera de aumento de presión). De modo que, excepto por pequeños cambios producidos por la temperatura, la densidad de un líquido en particular prácticamente es la misma a cualquier profundidad.[3]

Si presionas la mano contra una superficie, y alguien más presiona contra tu mano en la misma dirección, entonces la presión contra la superficie es mayor que si tú presionaras solo. Lo mismo ocurre con la presión atmosférica que presiona sobre la superficie de un líquido. Entonces, la presión total de un líquido es la densidad de peso multiplicada por la profundidad *más* la presión de la atmósfera. Cuando esta distinción sea importante, se usará el término *presión total*. De lo contrario, cuando se hable de la presión de un líquido se estará haciendo referencia a la presión sin importar la presión atmosférica que por lo general siempre está presente (en el siguiente capítulo aprenderás más acerca de la presión atmosférica).

Es importante reconocer que la presión no depende de la *cantidad* de líquido presente. El volumen no es la clave, la profundidad sí lo es. La presión promedio del agua que actúa contra una presa depende de la *profundidad* promedio del agua, no del volumen de agua que contenga, como se muestra en la Figura 13.4.

**FIGURA 13.3**
Para la jirafa no es problema que la presión del líquido dependa de la profundidad porque tiene un corazón grande y un intrincado sistema de válvulas y vasos sanguíneos elásticos y absorbentes en el cerebro. Sin dichas estructuras, la jirafa se desvanecería cuando elevara súbitamente la cabeza, y estaría sujeta a hemorragias cerebrales cuando la bajara.

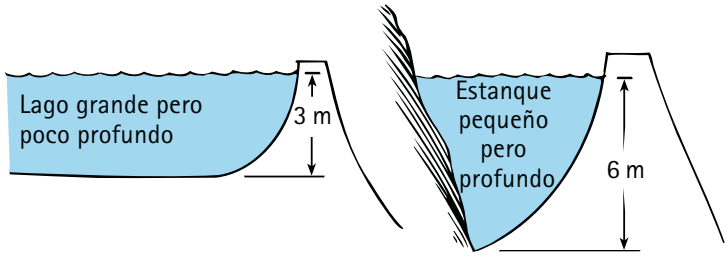



**FIGURA 13.4**
El gran lago poco profundo sólo ejerce la mitad de la presión promedio que ejerce el pequeño estanque profundo.

Sentirás la misma presión si sumerges la cabeza un metro bajo la superficie del agua en una pequeña alberca que si lo haces a la misma profundidad en medio de un gran lago. Lo mismo sucede con un pez. Observa los vasos comunicantes de la Figura 13.5. Si sostienes un pez dorado por la cola y sumerges su cabeza un par de centímetros bajo la superficie, la presión del agua sobre la cabeza del pez será

**VIDEO: Presa**

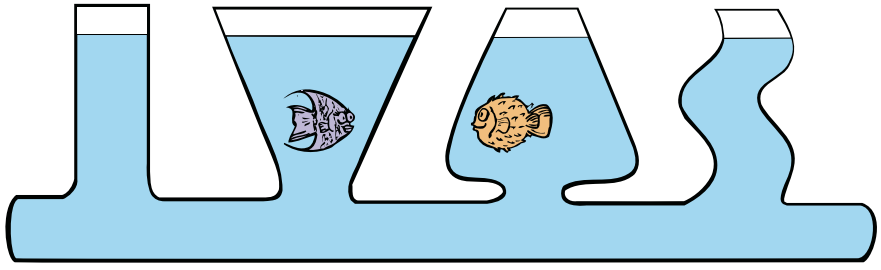


**FIGURA 13.5**
La presión del líquido es la misma con cualquier profundidad dada bajo la superficie, sin importar la forma del vaso contenedor. Presión del líquido = densidad de peso × profundidad (para la presión total, agrega la presión del aire en la parte superior).

[3]La densidad del agua dulce es 1,000 kg/m$^3$. Dado que el peso (*mg*) de 1,000 kg es 1,000 × 10 N/kg = 10,000 N, la densidad de peso del agua es 10,000 newtons por metro cúbico (o, con mayor precisión, 9,800 N/kg, si usas $g$ = 9.8 N/kg). La presión del agua bajo la superficie de un lago es simplemente igual a esta densidad multiplicada por la profundidad en metros. Por ejemplo, la presión del agua es 10,000 N/m$^2$ a una profundidad de 1 m y 100,000 N/m$^2$ a una profundidad de 10 m. En unidades del SI, la presión se mide en pascales, de modo que esto sería 10,000 Pa y 100,000 Pa, respectivamente; o, en kilopascales, 10 kPa y 100 kPa, respectivamente. Para la *presión total* en estos casos, agrega la presión de la atmósfera, 101.3 kPa.

la misma en cualquiera de los vasos. Si sueltas al pez y éste nada algunos centímetros más profundo, la presión sobre el pez aumentará con la profundidad y será la misma sin importar en cuál vaso esté. Si el pez nada hasta el fondo, la presión será mayor, pero no hay diferencia en cuál vaso nade. Todos los vasos están llenos hasta profundidades iguales, de modo que la presión del agua es la misma en el fondo de cada vaso, sin importar su forma o volumen. Si la presión del agua en el fondo de un vaso fuese mayor que la presión del agua en el fondo de un vaso vecino más estrecho, la mayor presión forzaría el agua hacia los lados y entonces subiría el vaso más estrecho a un nivel superior hasta que las presiones en el fondo se igualaran. Pero esto no ocurre. La presión depende de la profundidad, no del volumen, y así se ve que hay una razón por la que el agua busca su propio nivel.

El hecho de que el agua busque su nivel puede demostrarse si llenas una manguera con agua y sostienes los dos extremos a la misma altura. Los niveles del agua serán iguales. Si un extremo se eleva más que el otro, el agua saldrá del extremo más bajo, incluso si tiene que fluir "cuesta arriba" parte del camino. Este hecho no lo comprendieron del todo algunos de los antiguos romanos, quienes construyeron elaborados acueductos con arcos altos y rutas tortuosas para garantizar que el agua siempre fluyera ligeramente hacia abajo en cada lugar a lo largo de su ruta desde el depósito hasta la ciudad. Si las tuberías se tendieran en el suelo y siguieran el contorno natural del terreno, en algunos lugares el agua tendría que fluir cuesta arriba, y los romanos eran escépticos de esto. Todavía no se acostumbraba la experimentación cuidadosa, de modo que, con mucha mano de obra esclava, los romanos construyeron acueductos innecesariamente elaborados.

**pti**

- No todos los romanos de la Antigüedad creían que el agua no podía fluir colina arriba, como lo demuestran algunos de los sistemas de tuberías de aquellas épocas que corrían tanto hacia arriba como hacia abajo.

**FIGURA 13.6**
Los acueductos romanos garantizaban que el agua fluyera ligeramente colina abajo desde el depósito hasta la ciudad.

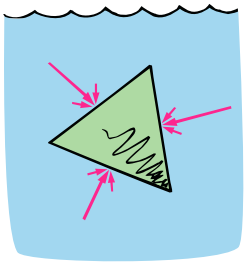


**FIGURA 13.7**
Las fuerzas de un líquido que presiona contra una superficie se suman para dar una fuerza neta que es perpendicular a la superficie.

Un hecho determinado experimentalmente acerca de la presión del líquido es que se ejerce por igual en todas direcciones. Por ejemplo, si te sumerges en el agua, sin importar en qué forma inclines la cabeza, sentirás la misma cantidad de presión del agua en los oídos. Puesto que un líquido puede fluir, la presión no sólo es hacia abajo. Se sabe que la presión también actúa hacia los lados cuando ves el agua borbotear en sentido lateral por una fuga en el costado de una lata erguida. Se sabe que la presión también actúa hacia arriba cuando intentas empujar una pelota de playa bajo la superficie del agua. El fondo de un bote ciertamente es empujado hacia arriba por la presión del agua.

Cuando el líquido presiona contra una superficie, hay una *fuerza* neta que es *perpendicular* a la superficie. Aunque la presión no tiene una dirección específica, la fuerza sí la tiene. Observa el bloque triangular de la Figura 13.7. Centra tu atención sólo en los tres puntos a medio camino a lo largo de cada superficie. El agua es forzada contra cada

punto desde muchas direcciones, de las cuales sólo se indican algunas. Los componentes de las fuerzas que no son perpendiculares a la superficie se cancelan entre sí y sólo dejan una fuerza perpendicular neta en cada punto.

Por eso el agua que borbotea de un agujero en una cubeta al principio sale de la cubeta en una dirección en ángulo recto con respecto a la superficie de la cubeta en la que se ubica el agujero. Luego se curva hacia abajo debido a la gravedad. La fuerza que ejerce un fluido sobre una superficie lisa siempre es en ángulos rectos con respecto a la superficie.[4]

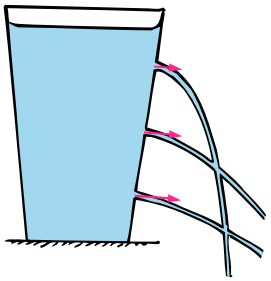


**FIGURA 13.8**
Los vectores de fuerza actúan en sentido perpendicular a la superficie interna del recipiente y aumentan con la profundidad.

**PUNTO DE CONTROL**

**Imagina que levantas un pie cuando estás de pie sobre una báscula de baño. ¿La presión que ejerces sobre la báscula cambia? ¿Hay una diferencia en la lectura de la báscula?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

Cuando desplazas tu peso al pararte en un pie, la presión sobre la superficie de la báscula se duplica. Pero la báscula no mide presión, mide peso. Excepto por algunas sacudidas mientras desplazas tu peso, la lectura de la báscula permanece igual.

**VIDEO: Flotabilidad**

## 13.3 Flotabilidad

Quienquiera que haya sacado del agua un objeto pesado sumergido, estará familiarizado con la *flotabilidad*, la aparente pérdida de peso experimentada por los objetos sumergidos en un líquido. Por ejemplo, levantar una gran roca desde el fondo del banco de un río es una tarea relativamente sencilla en tanto la roca esté por debajo de la superficie. Sin embargo, cuando la roca se levanta por encima de la superficie, la fuerza necesaria para levantarla es mucho mayor. Es por esto que, cuando la roca está sumergida, el agua ejerce una fuerza ascendente sobre ella que se opone exactamente a la dirección del jalón de la gravedad. Esta fuerza ascendente se llama **fuerza de flotación** (conocida también como *empuje hidrostático* o *fuerza boyante*), y es una consecuencia del aumento de la presión con la profundidad. La Figura 13.9 muestra por qué la fuerza de flotación actúa hacia arriba. Las fuerzas debidas a la presión del agua se ejercen en todas partes contra la roca en una dirección perpendicular a su superficie, como se muestra por los vectores. Los vectores de fuerza contra los lados a iguales profundidades se cancelan entre sí, de modo que no hay fuerza de flotación horizontal. Sin embargo, los vectores de fuerza en la dirección vertical no se cancelan. La presión es mayor contra el fondo de la roca porque el fondo está más profundo. De modo que las fuerzas ascendentes contra el fondo son mayores que las fuerzas descendentes contra la parte superior, lo que produce una fuerza neta ascendente: la fuerza de flotación.

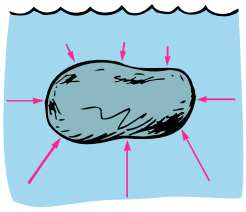


**FIGURA 13.9**
La presión mayor contra el fondo de un objeto sumergido produce una fuerza de flotación ascendente.

Para comprender la flotabilidad es indispensable comprender la expresión "volumen de agua desplazada". Si una piedra se coloca en un recipiente que está lleno de agua hasta el borde, parte del agua se desbordará (Figura 13.10). La piedra *desplaza* el agua. Un poco de razonamiento te dirá que el *volumen de la piedra* (es decir, la cantidad de espacio que ocupa) es igual al *volumen del agua desplazada*. Si colocas cualquier objeto en un recipiente parcialmente lleno de agua, el nivel de la superficie se eleva (Figura 13.11). ¿En cuánto? Exactamente en la misma cantidad que si un volumen de agua se vertiera en él e igualara el volumen del objeto sumergido. Éste es un buen método para determinar el volumen de objetos con forma irregular: *un objeto completamente sumergido siempre desplaza un volumen de líquido igual a su propio volumen*.

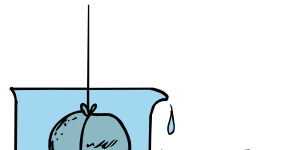


**FIGURA 13.10**
Cuando una piedra está sumergida, desplaza el agua que tiene un volumen igual al volumen de la piedra.

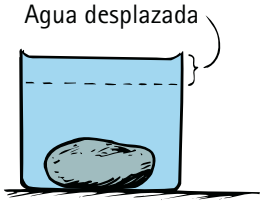



**FIGURA 13.11**
El aumento del nivel del agua es el mismo que si vertieras un volumen de agua igual al volumen de la piedra.

[4]La rapidez de salida del líquido por el orificio es $\sqrt{2gh}$, donde $h$ es la profundidad bajo la superficie libre. Es interesante que ésta es la misma rapidez que adquiriría el agua (o cualquier cosa) si cayera libremente la misma distancia vertical $h$.

**SCREENCAST: Flotabilidad**

**PUNTO DE CONTROL**

**Una receta requiere una cantidad específica de mantequilla. ¿Cuál es la relación entre el método de desplazamiento y el uso de una taza medidora de cocina?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Coloca un poco de agua en la taza antes de agregar la mantequilla. Observa la lectura del nivel del agua en un costado de la taza. Luego agrega la mantequilla y observarás que el nivel del agua se eleva. Puesto que la mantequilla flota, ponla bajo la superficie. Cuando restes la lectura del nivel inferior de la lectura del nivel superior, conocerás no sólo el volumen del agua desplazada, sino también el volumen de la mantequilla.

Si metes el pie en el agua, está inmerso. Si saltas al agua y te hundes bajo la superficie, la inmersión es total y estás sumergido.

**FIGURA 13.12**
Un litro de agua ocupa un volumen de 1,000 $cm^3$, tiene una masa de 1 kg y pesa 10 N (o, más precisamente, 9.8 N). En consecuencia, su densidad puede expresarse como 1 kg/L y su densidad de peso como 10 N/L. (El agua de mar es un poco más densa.)

**VIDEO: Principio de Arquímedes**

**SCREENCAST: Arquímedes**

## 13.4 Principio de Arquímedes

La relación entre la flotabilidad y el líquido desplazado la descubrió el científico griego Arquímedes en el siglo III a. C. Se plantea de la siguiente manera:

> **Un objeto inmerso es sostenido por una fuerza igual al peso del fluido que desplaza.**

Esta relación se llama **principio de Arquímedes**. Se aplica a líquidos y gases, ambos fluidos. Si un objeto inmerso desplaza 1 kg de fluido, la fuerza de flotación que actúa sobre él es igual al peso de 1 kg.[5] Por *inmerso*, se entiende o *completa* o *parcialmente sumergido*. Si sumerges a la mitad en agua un contenedor sellado de 1 L, desplazará medio litro de agua y será sostenido por una fuerza igual al peso de medio litro de agua, sin importar qué haya en el contenedor. Si lo sumerges por completo será sostenido por una fuerza igual al peso de un litro de agua (1 kg de masa). Si el contenedor está totalmente sumergido y no se comprime, la fuerza de flotación igualará el peso de 1 kg de agua a *cualquier* profundidad. Esto se debe a que, a cualquier profundidad, el contenedor no puede desplazar más volumen de agua que su propio volumen. Y el peso de esta agua desplazada (¡no el peso del objeto sumergido!) es igual a la fuerza de flotación.

Si un objeto de 30 kg desplaza 20 kg de fluido en la inmersión, su peso aparente será igual al peso de 10 kg (100 N). Observa que, en la Figura 13.13, el bloque de 3 kg tiene un peso aparente igual al peso de un bloque de 1 kg cuando se sumerge. El peso aparente de un objeto sumergido es su peso usual en aire menos la fuerza de flotación.

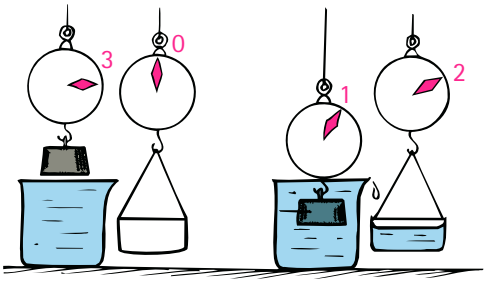



**FIGURA 13.13**
Los objetos pesan más en el aire que en el agua. Cuando un bloque de 3 kg se sumerge, la lectura de la báscula disminuye a 1 kg. El peso "faltante" es igual al peso de los 2 kg de agua desplazados, que es igual a la fuerza de flotación.

[5]En el laboratorio, tal vez sea conveniente expresar la fuerza de flotación en kilogramos, aun cuando un kilogramo sea una unidad de masa y no una unidad de fuerza. Así que, estrictamente hablando, la fuerza de flotación es el *peso* de 1 kg, que es 10 N (o, más preciso, 9.8 N). O también podrías decir que la fuerza de flotación es 1 *kilogramo peso*, no simplemente 1 kg.

Quizás tu profesor resuma el principio de Arquímedes con algún ejemplo numérico para mostrar que la diferencia entre las fuerzas que actúan hacia arriba y hacia abajo debida a similares diferencias de presión sobre un cubo sumergido es numéricamente idéntica al peso del fluido desplazado. Si la densidad es casi constante, como lo es para la mayoría de los líquidos, no representa ninguna diferencia cuán profundo se coloque el cubo. Si bien la presión aumenta con la profundidad, la *diferencia* entre la presión ascendente contra el fondo del cubo y la presión descendente contra la parte superior del cubo es la misma a cualquier profundidad (Figura 13.14). Cualquiera sea la forma del cuerpo sumergido, la fuerza de flotación es igual al peso del fluido desplazado.

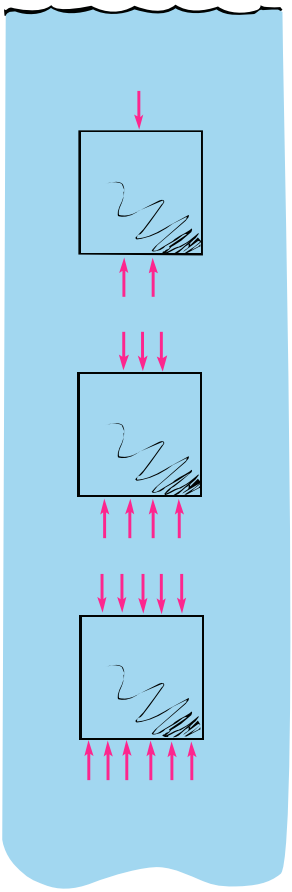


**FIGURA 13.14**
La diferencia entre las fuerzas ascendente y descendente que actúan sobre el bloque sumergido es la misma a cualquier profundidad.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Verdadero o falso? El principio de Arquímedes dice que cualquier objeto que desplaza 10 N de líquido tendrá una fuerza de flotación ascendente de 10 N.**
2. **Un recipiente de 1 L completamente lleno de plomo tiene una masa de 11.3 kg y se sumerge en agua. ¿Cuál es la fuerza de flotación que actúa sobre él?**
3. **Conforme una roca lanzada hacia un lago profundo se hunde cada vez más en el agua, ¿la fuerza de flotación sobre él aumenta o disminuye?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Verdadero. Sólo cuenta el peso del líquido desplazado. (Considéralo también a la luz de la tercera ley de Newton: si el objeto sumergido empuja hacia los lados 10 N de fluido, el fluido desplazado reacciona al empujar de vuelta sobre el objeto sumergido con 10 N.)
2. La fuerza de flotación es igual al peso del litro de agua desplazado, ¡no el peso del plomo! Un L de agua tiene una masa de 1 kg y pesa 10 N. De modo que la fuerza de flotación sobre él es 10 N.
3. La fuerza de flotación permanece invariable a medida que la roca se hunde, porque la roca desplaza el mismo volumen y el mismo peso de agua a cualquier profundidad.

## 13.5 ¿Qué hace que un objeto se hunda o flote?

Es importante recordar que la fuerza de flotación que actúa sobre un objeto sumergido depende del *volumen* del objeto. Los objetos pequeños desplazan cantidades pequeñas de agua y sobre ellos actúan fuerzas pequeñas de flotación. Los objetos grandes desplazan cantidades grandes de agua y sobre ellos actúan fuerzas de flotación más grandes. Es el *volumen* del objeto sumergido, no su *peso,* el que determina la fuerza de flotación. La fuerza de flotación es igual al peso del *volumen de fluido* desplazado. (La mala interpretación de esta idea es la raíz de mucha de la confusión que tiene la gente acerca de la flotabilidad.)

Sin embargo, el peso de un objeto sí es importante en la flotación. Que un objeto se hunda o flote en un líquido depende de cómo la fuerza de flotación *se compara con el peso del objeto*. Esto, a su vez, depende de la densidad del objeto. Ten en cuenta estas tres reglas simples:

1. **Un objeto más denso que el fluido en el que esté sumergido se hundirá.**
2. **Un objeto menos denso que el fluido en el que esté sumergido flotará.**
3. **Un objeto que tenga una densidad igual a la densidad del fluido en el que está sumergido ni se hundirá ni flotará.**

**SCREENCAST: Flotabilidad sobre un submarino**

**SCREENCAST: Más acerca de la flotabilidad**

**pti**

- Las personas que no pueden flotar son, 9 de cada 10 veces, hombres. La mayoría de los hombres son más musculosos y un poco más densos que las mujeres. Asimismo, las latas de gaseosa de dieta flotan, en tanto que las latas de gaseosa regular se hunden en el agua. ¿Qué te dice esto acerca de sus densidades relativas?

La regla 1 parece suficientemente razonable, porque los objetos más densos que el agua se hunden hasta el fondo, sin importar la profundidad del agua. Los buzos cerca del fondo de los cuerpos de agua profundos en ocasiones pueden encontrar un trozo de madera hundido que merodea por encima del suelo marino (con una densidad igual a la del agua a dicha profundidad), ¡pero nunca encuentran rocas flotantes!

De acuerdo con las reglas 1 y 2, ¿qué puedes decir acerca de las personas que, por más que intentan, no pueden flotar? ¡Simplemente son muy densas! Para flotar con más facilidad, debes reducir tu densidad. La fórmula *densidad de peso* = *peso/volumen* dice que debes o reducir tu peso o aumentar tu volumen. Usar un chaleco salvavidas aumenta el volumen al tiempo que agrega, consecuentemente, muy poco a tu peso. Reduce tu densidad total.

La regla 3 se aplica a los peces, que ni se hunden ni flotan. Por lo general, un pez tiene la misma densidad que el agua. Un pez puede regular su densidad al expandir y contraer un saco de aire en su cuerpo que cambia su volumen. El pez puede moverse hacia arriba al aumentar su volumen (lo que reduce su densidad) y hacia abajo al contraer su volumen (lo que aumenta su densidad).

Para un submarino, el peso, no el volumen, varía para lograr la densidad deseada. Los tanques de lastre toman o sacan agua. De igual modo, la densidad total de un cocodrilo aumenta cuando traga piedras. En los estómagos de cocodrilos grandes se han encontrado de 4 a 5 kg de piedras. Debido a este aumento de densidad, el cocodrilo nada más bajo en el agua y, por tanto, se descubre menos ante su presa (Figura 13.15).

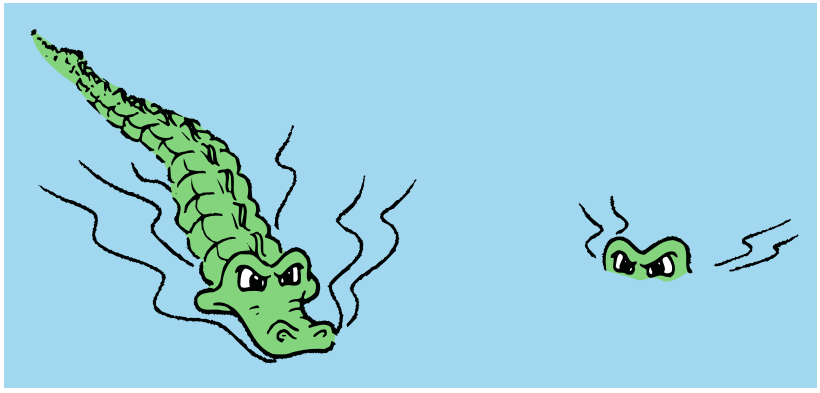


**FIGURA 13.15**
(Izquierda) Un cocodrilo que se acerca hacia ti en el agua. (Derecha) Un cocodrilo con piedras que se acerca hacia ti en el agua.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Dos bloques sólidos de idéntico tamaño se sumergen en agua. Un bloque es plomo y el otro es aluminio. ¿Sobre cuál es mayor la fuerza de flotación?**
2. **Si un pez se hace más denso, se hundirá; si se hace menos denso, se elevará. En términos de fuerza de flotación: ¿por qué esto es así?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La fuerza de flotación es la misma sobre ambos bloques porque desplazan el mismo volumen de agua. Para objetos sumergidos, la fuerza de flotación está determinada sólo por el volumen de agua desplazada, no por el peso del objeto.
2. Cuando el pez se vuelve más denso, al reducir su volumen, desplaza menos agua, de modo que la fuerza de flotación disminuye. Cuando el pez se vuelve menos denso al expandir su volumen, se desplaza más agua y la fuerza de flotación aumenta.

## 13.6 Flotación

Los pueblos antiguos fabricaban sus botes con madera. ¿Podrían haber diseñado un barco de hierro? No se sabe. La idea de que el hierro flotara quizás les parecía extraña. En la actualidad es fácil entender cómo puede flotar un barco hecho de hierro.

Imagina un bloque de 1 ton de hierro sólido. Puesto que el hierro es casi ocho veces más denso que el agua, el bloque sólo desplaza 1/8 ton de agua cuando se sumerge, lo que no es suficiente para mantenerlo a flote. Supón que das una nueva forma al mismo bloque de hierro y lo conviertes en un tazón (Figura 13.16). Todavía pesa 1 ton. Pero, cuando lo pones en el agua, desplaza un mayor volumen de agua que cuando era un bloque. Cuanto más profundo se sumerja el tazón de hierro, más agua desplazará y mayor será la fuerza de flotación que actúe sobre él. Cuando la fuerza de flotación sea igual a 1 ton, el tazón ya no se hundirá más.

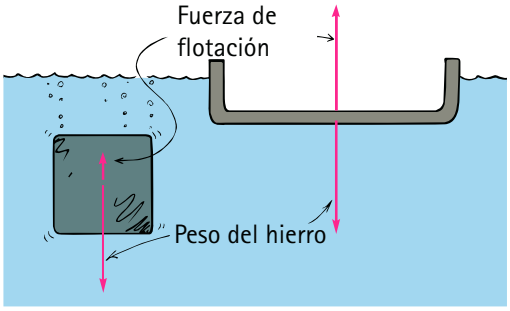



**FIGURA 13.16**
Un bloque de hierro se hunde, mientras que la misma cantidad de hierro con forma de tazón flota.

Cuando cualquier bote desplaza un peso de agua igual a su propio peso, flota. A esto se le denomina **principio de flotación**:

**Un objeto que flota desplaza un peso de fluido igual a su propio peso.**

Todo barco, todo submarino y todo dirigible debe estar diseñado para desplazar un peso de fluido igual a su propio peso. Por ende, un barco de 10,000 ton debe construirse del ancho suficiente para desplazar 10,000 ton de agua antes de hundirse demasiado en el agua. Lo mismo sucede con las naves en el aire. Un dirigible que pesa 100 ton desplaza al menos 100 ton de aire. Si desplaza más, se eleva; si desplaza menos, se cae. Si desplaza exactamente su peso, flota a una altitud constante.

**VIDEO: Flotación**

**FIGURA 13.17**
El peso de un objeto que flota es igual al peso del agua desplazada por la parte sumergida.

Para un volumen dado de fluido desplazado, un fluido más denso ejerce una mayor fuerza de flotación que un fluido menos denso. Por tanto, un barco flota más alto en agua salada que en agua dulce porque el agua salada es un poco más densa. De igual modo, un trozo sólido de hierro flotará en mercurio, aun cuando se hunda en agua.

La física de la Figura 13.18 es utilizada bastante bien por la Falkirk Wheel, un elevador giratorio de botes excepcional que sustituyó una serie de 11 exclusas en Escocia. Conectadas a su rueda de 35 m de alto hay dos góndolas rebosantes de agua. Cuando uno o más botes entran en una góndola, el agua que se desborda pesa exactamente tanto como los botes. De modo que las góndolas llenas de agua siempre pesan lo mismo ya sea que transporten botes o no, y la rueda siempre permanece equilibrada. Por tanto, a pesar de su enorme masa, la rueda gira cada media revolución con muy poco suministro de energía.

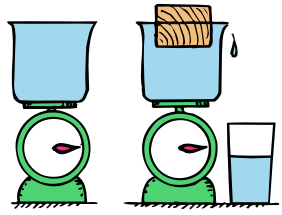


**FIGURA 13.18**
Un objeto flotante desplaza un peso de fluido igual a su propio peso.

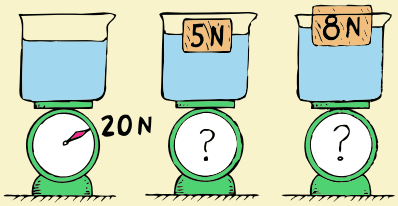
**FIGURA 13.19**
La Falkirk Wheel tiene dos góndolas equilibradas llenas de agua, una que sube y una que baja. Las góndolas giran a medida que la rueda da vueltas, de modo que el agua y el bote no se vierten.

**SCREENCAST: Problemas de flotabilidad**

Sólo en el caso especial de la flotación, la fuerza de flotación que actúa sobre un objeto es igual al peso del objeto.

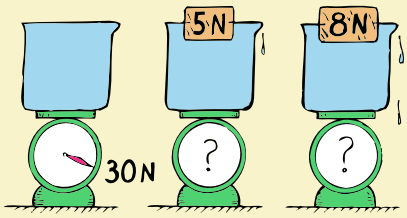
## PUNTO DE CONTROL

1. **Un vaso de precipitados lleno con agua a más de la mitad de su capacidad pesa 20 N. ¿Cuál será la lectura de la báscula cuando**




   a. **un bloque de madera de 5 N flota en él?**
   b. **un bloque de madera de 8 N flota en él?**

2. **El mismo vaso de precipitados, cuando se llena de agua, pesa 30 N. ¿Cuál será la lectura de la báscula, después de desbordarse, cuando**




   a. **un bloque de madera de 5 N flota en él?**
   b. **un bloque de madera de 8 N flota en él?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Las lecturas de la báscula aumentarán a medida que se agregue peso: a. 20 N + 5 N = 25 N, b. 20 N + 8 N = 28 N.
2. Para el vaso de precipitados que se desborda, el desplazamiento de agua por los bloques flotantes hace que el agua se desborde. a. El bloque de 5 N produce un desbordamiento de 5 N de agua, y b. el bloque de 8 N derrama 8 N de agua. De modo que la lectura de la báscula no cambia; permanece en 30 N.

## MONTAÑAS FLOTANTES

La punta de un *iceberg* que flota sobre la superficie del océano es aproximadamente 10% de todo el *iceberg*. Esto se debe a que el hielo tiene 0.9 veces la densidad del agua, de modo que 90% del mismo se sumerge en agua. De igual modo, una montaña flota sobre el manto semilíquido de la Tierra sólo mostrando su punta. Esto se debe a que la corteza continental de la Tierra tiene aproximadamente 0.85 veces la densidad del manto sobre el que flota; por ende, alrededor de 85% de una montaña se extiende por abajo de la superficie de la Tierra. Así que, al igual que los *icebergs* flotantes, las montañas tienen mucho más profundidad que altura.

Existe un interesante aspecto gravitacional secundario a esto: recuerda, del Capítulo 9, que el campo gravitacional en la superficie de la Tierra varía un poco con las variadas densidades de la roca subyacente (lo que constituye una valiosa información para los geólogos y los buscadores de petróleo), y que la gravitación es menor en la cima de una montaña debido a la mayor distancia del centro de la Tierra. Al combinar estas ideas se observa que, dado que el fondo de una montaña se extiende profundo en el manto de la Tierra, hay un aumento de distancia entre la cima de una montaña y el manto más denso. Este aumento de la "brecha" reduce aún más la gravitación en la parte superior de una montaña.

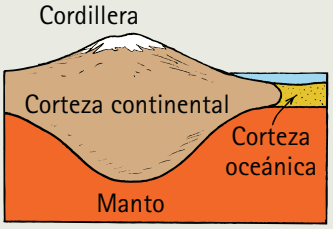



**FIGURA 13.20** La corteza continental es más profunda debajo de las montañas. (No a escala.)

Otro hecho interesante acerca de las montañas: si pudieras recortar la cima de un *iceberg*, éste sería más ligero y se levantaría por flotación casi hasta su altura original antes de ser recortado. De igual modo, cuando las montañas se erosionan, son más ligeras y son empujadas desde abajo para flotar casi hasta su altura original. De modo que, cuando se erosiona un kilómetro de montaña, un 85% de kilómetro de montaña es empujado hacia arriba desde abajo. Es por eso que las montañas tardan tanto tiempo en desgastarse.

**PUNTO DE CONTROL**

**Una barcaza cargada con grava se aproxima a un puente bajo por el que no puede pasar. ¿Debes *retirar* grava o *agregarla* a la barcaza?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

¡Jo, jo jo! ¿Crees que el viejo Hewitt te dará *todas* las respuestas a las preguntas del Punto de control? Enseñar bien consiste en plantear buenas preguntas, no en dar todas las respuestas. ¡Esta vez estás solo!

## 13.7 Principio de Pascal

Uno de los hechos más importantes sobre la presión de los fluidos es que un cambio de presión en una parte del fluido se transmitirá sin disminución hacia todas las demás partes del fluido. Por ejemplo, si la presión del agua de la ciudad aumenta en la estación de bombeo en 10 unidades de presión, entonces la presión en todas partes dentro de las tuberías del sistema de conexión aumentará en 10 unidades de presión (siempre que el agua esté en reposo). Esta regla, descubierta en el siglo XVII por Blaise Pascal, se llama **principio de Pascal**:

**Un cambio de presión en cualquier punto de un fluido encerrado en reposo se transmite sin disminución a todos los puntos del fluido.**

Llena un tubo en U con agua y coloca pistones en cada extremo, como se muestra en la Figura 13.21. La presión ejercida contra el pistón izquierdo se transmitirá por todo el líquido y contra el fondo del pistón derecho. (Los pistones son simplemente "tapones" que pueden deslizarse libre pero ajustadamente en el interior del tubo.) La presión que el pistón izquierdo ejerce contra el agua será exactamente igual a la presión que el agua ejerce contra el pistón derecho. Esto no es nada espectacular. Pero supón que haces que el tubo del lado derecho sea más ancho y usas un pistón de mayor área: entonces el resultado será impresionante. En la Figura 13.22 el pistón de la derecha tiene 50 veces el área del pistón de la izquierda (supón que el pistón izquierdo tiene un área transversal de 100 centímetros cuadrados y que el pistón derecho tiene un área transversal de 5,000 centímetros cuadrados). Supón que en el pistón izquierdo se coloca una carga de 10 kg. Entonces una presión adicional (casi 1 N/cm$^2$) debida al peso de la carga se transmite a todo el líquido y sube contra el pistón más grande. Es aquí donde se demuestra la diferencia entre fuerza y presión. La presión adicional se ejerce contra cada centímetro cuadrado del pistón más grande. Dado que hay 50 veces el área, se ejerce 50 veces más fuerza sobre el pistón más grande. Por tanto, el pistón más grande soportará una carga de 500 kg, ¡50 veces la carga sobre el pistón más pequeño!

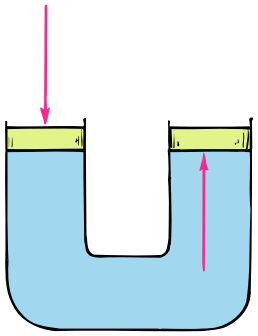


**FIGURA 13.21**
La fuerza ejercida sobre el pistón izquierdo aumenta la presión en el líquido y se transmite hacia el pistón derecho.

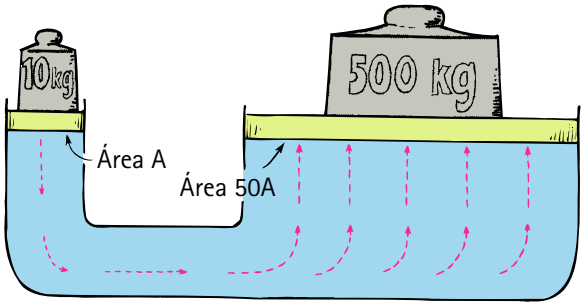



**FIGURA 13.22**
Una carga de 10 kg en el pistón izquierdo soportará 500 kg en el pistón derecho.

**SCREENCAST**: Principio de Pascal

Esto *sí* es algo espectacular, porque es posible multiplicar fuerzas con tal dispositivo. Un newton de entrada produce 50 newtons de salida. Al aumentar aún más el área del pistón más grande (o reducir el área del pistón más pequeño), puedes multiplicar la fuerza, en principio, por cualquier cantidad. El principio de Pascal sirve de base para la operación de todos los dispositivos hidráulicos, de los cuales el más simple es la prensa hidráulica.

La prensa hidráulica no viola la conservación de la energía, porque una disminución en la distancia recorrida compensa el aumento en la fuerza. Cuando el pistón pequeño de la Figura 13.22 se mueve hacia abajo 10 centímetros, el pistón grande se elevará sólo 1/50 de esto, o 0.2 centímetros. La fuerza de entrada multiplicada por la distancia recorrida por el pistón más pequeño es igual a la fuerza de salida multiplicada por la distancia recorrida por el pistón más grande; éste es un ejemplo más de una máquina simple que funciona con el mismo principio que la palanca mecánica.

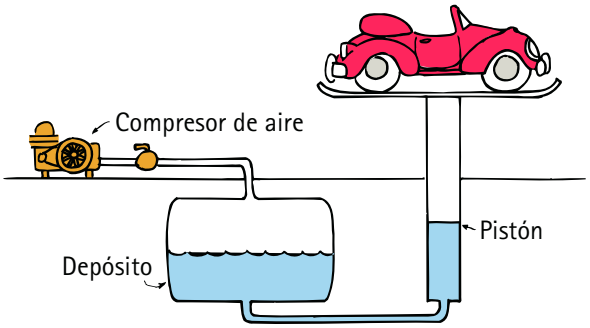



**FIGURA 13.23**
El principio de Pascal en una estación de servicio.

El principio de Pascal se aplica a todos los fluidos, ya sean gases o líquidos. Una aplicación común del principio de Pascal para gases y líquidos es el elevador de automóviles que se ve en muchos talleres de reparación (Figura 13.23). El aumento en la presión del aire producido por un compresor de aire se transmite a través del aire hacia la superficie de aceite en un depósito subterráneo. El aceite, a su vez, transmite la presión a un pistón, que eleva al automóvil. La presión relativamente baja que ejerce la fuerza de elevación contra el pistón es aproximadamente la misma que la presión del aire de los neumáticos del automóvil.

La hidráulica se emplea en los dispositivos modernos, desde los muy pequeños hasta los enormes. Observa los pistones hidráulicos de casi todas las máquinas de construcción donde se involucran cargas pesadas. Las muchas aplicaciones del principio de Pascal verdaderamente cambiaron el panorama del mundo.

**FIGURA 13.24**
El principio de Pascal actúa en los dispositivos hidráulicos de estas máquinas increíbles. Uno se pregunta si Pascal imaginó la medida en la que su principio permitiría levantar cargas inmensas con tanta facilidad.

## PUNTO DE CONTROL

1. **A medida que se eleva el automóvil de la Figura 13.23, ¿cómo se compara el cambio del nivel de aceite en el depósito con la distancia que se mueve el automóvil?**
2. **Si un amigo comentó que un dispositivo hidráulico es una forma común de multiplicar energía, ¿tú qué dirías?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. El automóvil sube una mayor distancia que lo que baja el nivel de aceite, pues el área del pistón es más pequeña que el área superficial del aceite en el depósito.
2. ¡No, no, no! Aunque un dispositivo hidráulico, como una palanca mecánica, puede multiplicar una *fuerza*, siempre lo hace a costa de la distancia. La energía es el producto de la fuerza y la distancia. Si aumentas una, disminuyes la otra. ¡Jamás se ha encontrado ningún dispositivo que pueda multiplicar energía!

## 13.8 Tensión superficial

Imagina que suspendes un trozo doblado de alambre limpio de un resorte espiral sensible (Figura 13.25), bajas el alambre al agua y luego lo subes. Mientras tratas de liberar el alambre de la superficie del agua, ves en el resorte estirado que la superficie del agua ejerce una fuerza considerable sobre el alambre. La superficie del agua se resiste a ser estirada, pues tiene una tendencia a contraerse. Esto es evidente cuando se humedece un pincel de pelo fino. Cuando el pincel está bajo el agua, las cerdas están prácticamente tan suaves como lo están cuando el pincel está seco, pero cuando sacas el pincel del agua, la película superficial de agua contrae y junta las cerdas (Figura 13.26). Esta tendencia a la contracción de la superficie de los líquidos se llama **tensión superficial**.

La tensión superficial explica la forma esférica de las gotas de líquidos. Las gotas de lluvia, de aceite y las que caen de los metales fundidos son esféricas porque sus superficies tienden a contraerse y obligan a cada gota a adoptar la forma que tenga menor área superficial. Ésta es una esfera, la figura geométrica que tiene la menor área superficial para un volumen dado. Por esta razón, las gotas de niebla y de rocío sobre las telarañas o sobre las vellosas hojas de las plantas son casi esféricas. (Cuanto más grandes sean, más las aplanará la gravedad.)

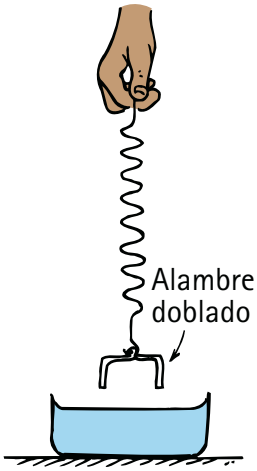



**FIGURA 13.25**
Cuando el alambre doblado se baja hacia el agua y luego se eleva, el resorte se estirará debido a la tensión superficial.

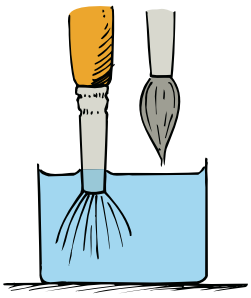


**FIGURA 13.26**
Cuando el pincel se saca del agua, las cerdas se mantienen unidas por la tensión superficial.

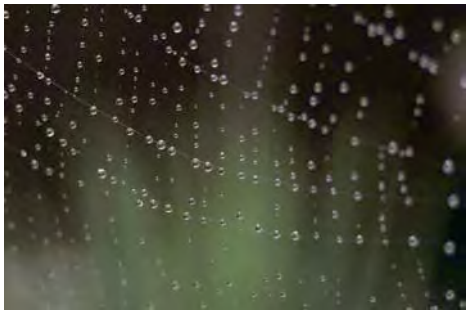


**FIGURA 13.27**
Las pequeñas gotas de agua adquieren formas esféricas debido a la tensión superficial.

La tensión superficial es causada por atracciones moleculares. Bajo la superficie, cada molécula es atraída en todas direcciones por las moléculas vecinas, lo que da por resultado que no haya ninguna tendencia a ser jaladas en una dirección específica. Sin embargo, una molécula sobre la superficie de un líquido es jalada sólo por las moléculas vecinas a cada lado y hacia abajo desde abajo; no hay un jalón hacia arriba (Figura 13.28). Por ende, estas atracciones moleculares tienden a jalar la molécula desde la superficie hacia el líquido, y esta tendencia reduce al mínimo el área superficial. La superficie se comporta como si estuviera tensa en una película elástica. Esto es evidente cuando una aguja de acero o un clip de papel secos parecen flotar sobre

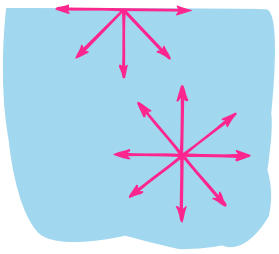


**FIGURA 13.28**
Una molécula en la superficie es jalada sólo hacia los lados y hacia abajo por las moléculas vecinas. Una molécula bajo la superficie es jalada igualmente en todas direcciones.

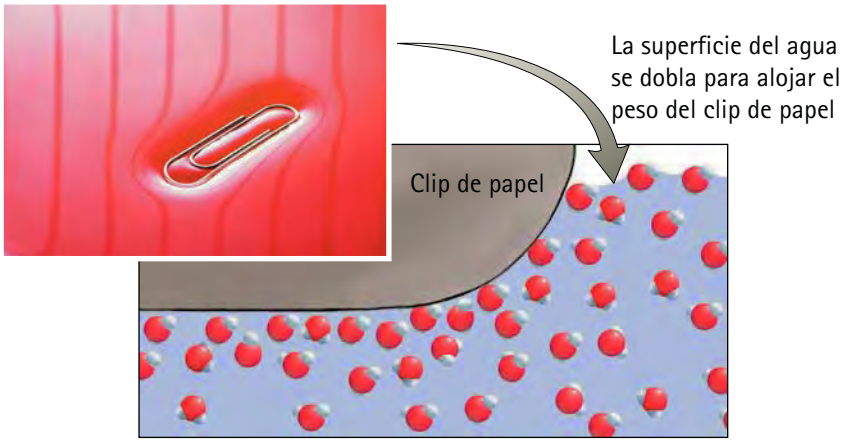



**FIGURA 13.29**
Un clip de papel reposa sobre el agua, y empuja la superficie hacia abajo ligeramente sin hundirse.

**FIGURA 13.30**
El maestro de las burbujas, Tom Noddy, sopla burbujas dentro de burbujas. La burbuja grande se estira debido al soplido, pero rápidamente se asentará en una forma esférica debido a la tensión superficial.

el agua en reposo. La Figura 13.29 muestra un clip de papel que no flota *en* el agua, sino que reposa *sobre* el agua. La ligera depresión en la superficie del agua es causada por el peso del clip, que empuja hacia abajo sobre el agua. La tendencia elástica que se encuentra en la superficie es la tensión superficial, suficiente para sostener el peso del clip. La tensión superficial permite a ciertos insectos, como los zancudos de agua de la familia de los *Gerridae*, correr por la superficie de un estanque.

La tensión superficial del agua es mayor que la de otros líquidos comunes, y el agua pura tiene una tensión superficial más fuerte que el agua jabonosa. Puedes ver esto cuando una pequeña película de jabón sobre la superficie del agua es efectivamente estirada sobre toda la superficie. Esto reduce al mínimo el área superficial del agua. Lo mismo ocurre con el aceite o la grasa que flotan sobre el agua. El aceite tiene menos tensión superficial que el agua fría, y se estira en una película que cubre toda la superficie. Esta dispersión es evidente en los derrames de petróleo. Sin embargo, el agua caliente tiene menos tensión superficial que el agua fría, porque las moléculas que se mueven más rápido no están enlazadas tan firmemente. Esto permite que la grasa o el aceite de las sopas calientes flote en pequeñas burbujas sobre la superficie de la sopa. Cuando la sopa se enfría y la tensión superficial del agua aumenta, la grasa o el aceite se extiende sobre la superficie de la sopa. La sopa se vuelve "grasosa". La sopa caliente sabe diferente a la sopa fría principalmente porque la tensión superficial del agua en la sopa cambia con la temperatura.

## 13.9 Capilaridad

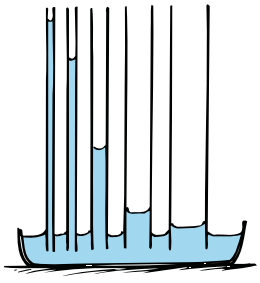


**FIGURA 13.31**
Tubos capilares.

Cuando el extremo de un tubo de vidrio completamente limpio, con un diámetro interior pequeño, se sumerge en el agua, el agua moja el interior del tubo y se eleva en él. En un tubo con una perforación de aproximadamente ½ milímetro de diámetro, por ejemplo, el agua se eleva ligeramente más arriba de 5 centímetros. Con una perforación todavía menor, el agua se eleva mucho más alto (Figura 13.31). Este ascenso de un líquido por un tubo hueco delgado o en un espacio estrecho se llama **capilaridad**.

Cuando pienses en capilaridad, piensa que las moléculas son como bolas pegajosas. Las moléculas de agua se pegan al vidrio más que entre ellas mismas. La atracción entre sustancias distintas como agua y vidrio se llama *adhesión*. La atracción entre sustancias parecidas, pegajosidad molecular, se llama *cohesión*. Cuando un tubo de vidrio se sumerge en agua, la adhesión entre el vidrio y el agua hace que una delgada película de agua se estire sobre las superficies interior y exterior del tubo (Figura 13.32a). La tensión superficial hace que esta película se contraiga (Figura 13.32b). La película en la superficie exterior se contrae lo suficiente para formar un borde redondeado. La película en la superficie interior se contrae más y eleva el agua consigo hasta que la fuerza adhesiva se equilibra por el peso del agua elevada (Figura 13.32c). En un tubo más estrecho, el peso del agua en el tubo es menor y el agua se eleva más de lo que lo haría si el tubo fuera más ancho.

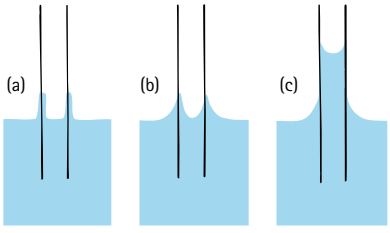



**FIGURA 13.32**
Etapas hipotéticas de acción capilar, en vistas transversales de un tubo capilar.

Si un pincel se sumerge parcialmente en agua, el agua se elevará por los espacios estrechos entre las cerdas por la acción capilar. Si tu cabello es largo, deja que cuelgue en el fregadero o en la tina, y el agua subirá al cuero cabelludo de la misma forma. Así es como el aceite empapa la mecha de una lámpara y el agua empapa una toalla cuando un extremo cuelga en el agua. Sumerge un extremo de un terrón de azúcar en café y todo el terrón se humedecerá rápidamente. La acción capilar es esencial para el crecimiento de las plantas. En los árboles lleva agua a las ramas y hojas altas desde las raíces de la planta y transporta savia y nutrientes de las hojas a las raíces. Casi en cualquier parte que mires, podrás ver la capilaridad en acción. Eso es bueno.

Pero, para un insecto la capilaridad no es tan buena. Recuerda del Capítulo 12 que, debido al área superficial relativamente grande de un insecto, éste cae lentamente en el aire. La gravedad casi no plantea riesgo, mas no así la capilaridad. Estar al borde del agua puede ser mortal para un insecto, a menos que esté equipado para el agua como el zancudo de agua (*Gerridae*).

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Presión.** La razón de la fuerza con respecto al área sobre la cual se distribuye dicha fuerza:

$$\text{Presión} = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}}$$

$$\text{Presión del líquido} = \text{densidad de peso} \times \text{profundidad}$$

**Fuerza de flotación.** Fuerza neta ascendente que un fluido ejerce sobre un objeto sumergido.

**Principio de Arquímedes.** Un cuerpo sumergido es sostenido por una fuerza igual al peso del fluido que desplaza.

**Principio de flotación.** Un objeto flotante desplaza un peso de fluido igual a su propio peso.

**Principio de Pascal.** La presión aplicada a un fluido sin movimiento confinado en un recipiente se transmite sin disminución a través del fluido.

**Tensión superficial.** Tendencia de la superficie de un líquido a contraerse en área y, por ende, a comportarse como una membrana elástica estirada.

**Capilaridad.** El ascenso de un líquido por un tubo hueco fino o por un espacio estrecho.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 13.1 Presión

1. ¿Cómo se relaciona la presión con la fuerza?

### 13.2 Presión de un líquido

2. ¿Cómo se relaciona la presión en el fondo de un cuerpo de agua con el peso del agua sobre cada metro cuadrado de la superficie inferior?
3. ¿Cuál es la relación entre la presión del líquido y la profundidad de un líquido? ¿Entre la presión del líquido y la densidad de peso?
4. Si nadas bajo la superficie en agua salada, ¿la presión será mayor que en agua dulce a la misma profundidad?
5. ¿Cómo se compara la presión del agua 1 m bajo la superficie de un pequeño estanque, con la presión del agua 1 m bajo la superficie de un enorme lago?
6. Si perforas un orificio en un recipiente lleno con agua, ¿en qué dirección fluirá inicialmente el agua fuera del recipiente?

### 13.3 Flotabilidad

7. ¿Por qué la fuerza de flotación actúa hacia arriba sobre un objeto sumergido en agua?
8. ¿Por qué no hay fuerza de flotación horizontal sobre un objeto sumergido?
9. ¿Cómo se compara el volumen de un objeto completamente sumergido con el volumen del agua desplazada?

### 13.4 Principio de Arquímedes

10. ¿Cómo se compara la fuerza de flotación sobre un objeto sumergido con el peso del agua desplazada?
11. Distingue entre un cuerpo *en inmersión* y un cuerpo *sumergido*.
12. ¿Cuál es la masa de 1 L de agua? ¿Su peso en newtons?
13. Si un recipiente de 1 L se sumerge a la mitad en agua, ¿cuál es el volumen del agua desplazada? ¿Cuál es la fuerza de flotación sobre el recipiente?

### 13.5 ¿Qué hace que un objeto se hunda o flote?

14. ¿La fuerza de flotación sobre un objeto sumergido es igual al peso del objeto o igual al peso del fluido desplazado por el objeto?
15. ¿Cuál es la condición en la que la fuerza de flotación sobre un objeto *sí es* igual al peso del objeto?
16. ¿La fuerza de flotación sobre un objeto sumergido depende del volumen del objeto o del peso del objeto?
17. Llena los espacios: Un objeto más denso que el agua _____ en el agua. Un objeto menos denso que el agua _____ en el agua. Un objeto que tenga la misma densidad que el agua _____ en el agua.
18. ¿Cómo se controla la densidad de un pez? ¿Cómo se controla la densidad de un submarino?

### 13.6 Flotación

19. Anteriormente se puso énfasis en que la fuerza de flotación no es igual al peso de un objeto, sino que es igual al peso del agua desplazada. Ahora se dice que la fuerza de flotación es igual al peso del objeto. ¿No es esto una gran contradicción? Explica.
20. ¿Por qué las góndolas de la Falkirk Wheel (Figura 13.19) tienen el mismo peso ya sea que transporten o no transporten botes?

### 13.7 Principio de Pascal

21. ¿Qué ocurre con la presión en todas partes de un fluido confinado si la presión en una parte aumenta?
22. Si la presión en una prensa hidráulica aumenta en 10 $N/cm^2$ adicionales, ¿cuánta carga adicional soportará el pistón de salida si su área transversal es 50 $cm^2$?

### 13.8 Tensión superficial

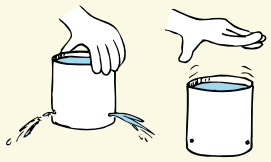
23. ¿Qué forma geométrica tiene el área superficial más pequeña para un volumen dado?
24. ¿Cuál es la causa de la tensión superficial?

### 13.9 Capilaridad

25. Distingue entre fuerzas *adhesivas* y *cohesivas*.
26. ¿Cómo se relaciona la altura a la que sube el agua en un tubo capilar, con la adhesión y con el peso del agua levantada?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

27. Coloca un huevo en una cacerola con agua del grifo. Luego disuelve sal en el agua hasta que el huevo flote. ¿Cómo se compara la densidad de un huevo con la del agua del grifo? ¿Con la del agua salada?
28. Si perforas un par de orificios en el fondo de un recipiente lleno de agua, el agua saldrá debido a la presión del agua. Ahora suelta el recipiente y, mientras está en caída libre, ¡observa que ya no sale agua! Si tus amigos no entienden esto, ¿podrías resolverlo y explicárselos?



29. Pon a flotar una pelota de ping-pong mojada en agua en una lata con agua que esté sostenida a más de un metro por encima de un suelo rígido. Luego suelta la lata. Una inspección cuidadosa te mostrará que la bola fue llevada bajo la superficie mientras la pelota y la lata caían. (¿Qué te dice esto acerca de la tensión superficial?) Más asombroso, cuando la lata impacte con el suelo, ¿qué sucede con la pelota y por qué? ¡Inténtalo y te sorprenderás! (*Precaución*: A menos que lleves gafas de seguridad, aleja la cabeza de arriba de la lata cuando ésta impacte.)
30. El jabón debilita enormemente las fuerzas cohesivas entre las moléculas de agua. Puedes ver esto si agregas algo de aceite a una botella de agua y la agitas de modo que el aceite y el agua se mezclen. Observa que el aceite y el agua se separan rápidamente en cuanto dejas de agitar la botella. Ahora agrega algo de jabón líquido a la mezcla. Agita la botella de nuevo y verás que el jabón forma una delgada película alrededor de cada pequeña cuenta de aceite y que se necesita más tiempo para que el aceite se combine después de dejar de agitar la botella. Así es como funciona el jabón en la limpieza. Rompe la tensión superficial alrededor de cada partícula de mugre de modo que el agua pueda llagar a las partículas y rodearlas. El enjuague se lleva la mugre. El jabón es un buen limpiador sólo en presencia de agua.
31. Espolvorea pimienta negra sobre la superficie de un poco de agua pura en un platillo. La pimienta flota. Agrega una gota de jabón líquido a la superficie y los granos de pimienta se repelen de la gota de jabón. Agita suavemente una o dos veces y observa cómo se hunde la pimienta.

## SUSTITUYE Y LISTO (FAMILIARIZACIÓN CON ECUACIONES)

$$\text{Presión} = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}}$$

32. Calcula la presión que ejerce un bloque de 10 N sobre la mesa donde descansa, si su área de contacto es 50 $cm^2$.

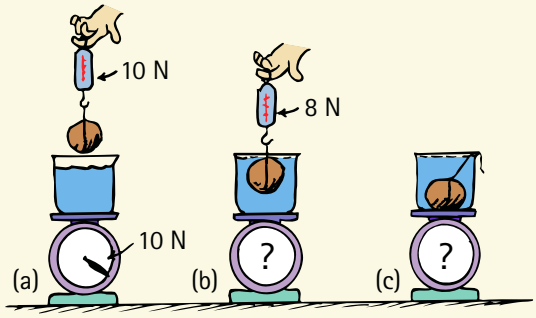
**Presión = densidad de peso × profundidad**

*(Usa 10,000 $N/m^3$ para la densidad de peso del agua e ignora la presión debida a la atmósfera en los siguientes cálculos.)*

33. Un barril de 1 m de alto está lleno de agua (con una densidad de peso de 10,000 $N/m^3$). Demuestra que la presión del agua sobre el fondo del barril es 10,000 $N/m^2$ o, de manera equivalente, 10 kPa.
34. Demuestra que la presión del agua en el fondo de la torre de agua de 50 m de alto, que se muestra en la fotografía de apertura del capítulo, es 500,000 $N/m^2$, que es aproximadamente 500 kPa.
35. La profundidad del agua detrás de la presa Hoover es 220 m. Demuestra que la presión del agua en la base de esta presa es 2,200 kPa.
36. El piso superior de un edificio está 20 m arriba del sótano. Demuestra que la presión del agua en el sótano es casi 200 kPa mayor que la presión del agua en el piso superior.

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

37. Calcula la fuerza promedio por clavo cuando Sarah, quien pesa 120 libras, se acuesta en una cama de clavos y es sostenida por 600 clavos (consulta la Figura 13.2).
38. Imagina que equilibras una bola de 5 kg en la punta de tu dedo, que tiene un área de 1 $cm^2$. Demuestra que la presión sobre tu dedo es de 50 $N/cm^2$, que es 500 kPa.
39. Un trozo de metal de 12 kg desplaza 2 L de agua cuando se sumerge. Demuestra que su densidad es 6,000 $kg/m^3$. ¿Cómo se compara esto con la densidad del agua?
40. Un barril de 1 m de alto está cerrado en la parte superior excepto por un pequeño tubo que se extiende 5 m por arriba de la parte superior. Cuando el barril está lleno con agua hasta la base del tubo (1 m de profundidad), la presión del agua sobre la parte inferior del barril es 10 kPa. ¿Cuál es la presión sobre la parte inferior cuando se agrega agua para llenar el tubo hasta su parte superior?
41. Una presa en Holanda empieza a hacer agua a través de un orificio de 1 $cm^2$ de área a una profundidad de 2 m bajo la superficie del agua. ¿Cuánta fuerza debe aplicar un niño al orificio con su pulgar para detener la fuga? ¿Podría hacerlo?
42. En el laboratorio descubres que una roca de 1 kg suspendida encima del agua pesa 10 N. Cuando la roca se suspende debajo de la superficie del agua, la lectura de la báscula es 8 N.

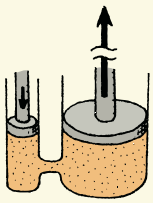



a. ¿Cuál es la fuerza de flotación sobre la roca?

b. Si el recipiente de agua pesa 10 N sobre la báscula, ¿cuál es la lectura de la báscula cuando la roca se suspende debajo de la superficie del agua?

c. ¿Cuál es la lectura de la báscula cuando la roca se libera y descansa en el fondo del recipiente?

43. Un mercader en Katmandú te vende una estatua de oro sólido de 1 kg a un precio muy razonable. Cuando llegas a casa, te preguntas si conseguiste o no una ganga, de modo que sumerges la estatua en un recipiente de agua y mides el volumen de agua desplazada. Demuestra que, para el oro puro, el volumen de agua desplazada será 51.8 $cm^3$.



44. En los pistones hidráulicos que se muestran en el dibujo, el pistón pequeño tiene un diámetro de 2 cm. El pistón grande tiene un diámetro de 6 cm. ¿Cuánta más fuerza puede ejercer el pistón más grande, comparada con la fuerza aplicada al pistón más pequeño?

45. Tu amigo, de 100 kg de masa, apenas puede flotar en agua dulce. Calcula su volumen aproximado.

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

46. Clasifica las presiones, de mayor a menor, para lo siguiente:

a. Fondo de un recipiente de 20 cm de alto con agua salada

b. Fondo de un recipiente de 20 cm de alto con agua dulce

c. Fondo de un recipiente de 5 cm de alto con mercurio

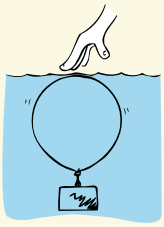
47. Clasifica lo siguiente, de mayor a menor, por el porcentaje de su volumen arriba de la línea de agua:

a. Balón de básquetbol que flota en agua dulce

b. Balón de básquetbol que flota en agua salada

c. Balón de básquetbol que flota en mercurio

48. Piensa en lo que ocurre con el volumen de un globo lleno de aire arriba del agua y debajo del agua. Luego clasifica las fuerzas de flotación sobre un globo con pesas en agua, de mayor a menor, cuando



a. apenas flota con su parte superior en la superficie.

b. se empuja 1 m bajo la superficie.

c. se empuja 2 m bajo la superficie.

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

49. ¿Qué líquido común cubre más de dos tercios del planeta, constituye 60% de tu cuerpo y sostiene la vida y los estilos de vida en incontables formas?

50. Sabes que un cuchillo filoso corta mejor que un cuchillo romo. ¿Sabes por qué? Defiende tu respuesta.

51. ¿Qué es más probable que te lastime: ser pisado por un hombre de 200 lb que usa mocasines, o ser pisado por una mujer de 100 lb que usa tacones de aguja?

52. ¿Cuál supones que ejerce más presión sobre el suelo: un elefante de 5,000 kg o una mujer de 50 kg de pie sobre tacones de aguja? (¿Cuál es más probable que haga muescas en un piso de linóleo?) Realiza un cálculo aproximado para cada uno.

53. ¿Por qué las personas que están confinadas a la cama tienen menos probabilidad de desarrollar llagas en el cuerpo si descansan sobre una cama de agua que sobre un colchón ordinario?

54. ¿Por qué la presión sanguínea se mide en el brazo, a la altura del corazón?

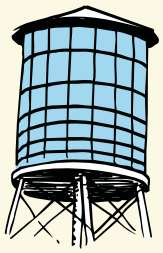
55. ¿Por qué tu cuerpo consigue más descanso cuando te acuestas que cuando te sientas? ¿La presión sanguínea en tus piernas es mayor?

56. Cuando estás de pie, la presión sanguínea en tus piernas es mayor que en la parte superior de tu cuerpo. ¿Esto sería cierto para un astronauta en órbita? Defiende tu respuesta.

57. Si los grifos del piso superior y el piso inferior se abren completamente, ¿fluirá más agua por segundo de los grifos del piso superior o de los del piso inferior?

58. ¿Cómo se compara la presión del agua 1 m bajo la superficie de un lago, con la presión del agua 1 m bajo la superficie de una alberca?

59. El dibujo muestra un depósito de madera reforzado con aros metálicos que suministra agua a una granja. a. ¿Por qué está elevado? b. ¿Por qué los aros están más juntos cerca de la parte inferior del tanque?



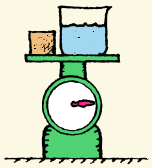
60. Un bloque de aluminio con un volumen de 10 $cm^3$ se coloca en un vaso de precipitados con agua hasta el borde. El agua se desborda. Lo mismo se hace en otro vaso de precipitados con un bloque de plomo de 10 $cm^3$. ¿El plomo desplaza más, menos o la misma cantidad de agua?

61. Un bloque de aluminio con una masa de 1 kg se coloca en un vaso de precipitados con agua hasta el borde. El agua se desborda. Lo mismo se hace en otro vaso de precipitados con un bloque de plomo de 1 kg. ¿El plomo desplaza más, menos o la misma cantidad de agua?

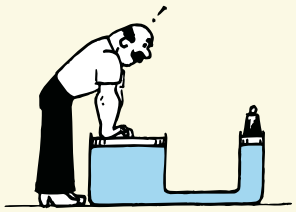
62. Un bloque de aluminio con un peso de 10 N se coloca en un vaso de precipitados con agua hasta el borde. El agua se desborda. Lo mismo se hace con otro vaso de precipitados con un bloque de plomo de 10 N. ¿El plomo desplaza más, menos o la misma cantidad de agua? (¿Por qué tus respuestas difieren de las respuestas a las dos preguntas anteriores?)

63. En 1960, el batiscafo *Trieste* (un sumergible) de la marina estadounidense descendió hasta una profundad de casi 11 km en la Fosa de las Marianas, cerca de Filipinas, en el Océano Pacífico. En lugar de una gran ventana de visualización, tenía una pequeña ventana circular de 15 cm de diámetro. ¿Cuál es tu explicación para tan pequeña ventana?

64. Si te has preguntado acerca de la descarga de los retretes en los pisos superiores de los rascacielos, ¿cómo supones que está diseñada la plomería de modo que no haya un enorme impacto de desechos que llegan al nivel del sótano? (Verifica tus especulaciones con alguien que tenga conocimientos de arquitectura.)
65. ¿Por qué el agua "busca su nivel"?
66. Cuando te bañas en una playa rocosa, ¿por qué las piedras del fondo lastiman menos tus pies cuando te paras en agua profunda?
67. Si la presión de un líquido fuera la misma en todas las profundidades, ¿habría una fuerza de flotación sobre un objeto sumergido en el líquido? Explica.
68. ¿Por qué es más fácil flotar en agua salada que en agua dulce?
69. Para responder a la pregunta de por qué los cuerpos flotan más en agua salada que en agua dulce, tu amigo responde que la razón es que el agua salada es más densa que el agua dulce. (¿Tu amigo con frecuencia sólo recita enunciados fácticos que se relacionan con las respuestas y no ofrece razones concretas?) ¿Cómo responderías a la misma pregunta?
70. Una lata de gaseosa dietética flota en el agua, en tanto que una lata de gaseosa regular se hunde. Explica este fenómeno, primero en términos de densidad, luego en términos de peso frente a la fuerza de flotación.
71. ¿Por qué un bloque de hierro flotará en mercurio pero se hundirá en agua?
72. Las montañas de los Himalayas son un poco menos densas que el material del manto sobre el cual "flotan". ¿Supones que, al igual que los *icebergs* flotantes, son más profundos que altos?
73. ¿Por qué una alta montaña compuesta principalmente de plomo es una imposibilidad en la Tierra?
74. ¿Cuánta fuerza se necesita para mantener bajo la superficie del agua un cartón rígido de 1 L casi sin peso?
75. ¿Por qué un balón de voleibol sostenido bajo la superficie del agua soporta más fuerza de flotación que si estuviera flotando?
76. ¿Por qué una pelota de playa inflada, empujada bajo la superficie del agua, se dispara con rapidez sobre la superficie del agua cuando se le libera?
77. ¿Por qué es inexacto decir que los objetos pesados se hunden y que los objetos ligeros flotan? Ofrece ejemplos exagerados que sustenten tu respuesta.
78. ¿Por qué la fuerza de flotación sobre un submarino sumergido es mucho mayor que la fuerza de flotación sobre él mientras flota?
79. ¿Una roca ganará o perderá fuerza de flotación mientras se hunde más profundo en el agua? ¿O la fuerza de flotación permanecerá igual a mayores profundidades? Defiende tu respuesta.
80. ¿Una nadadora ganará o perderá fuerza de flotación mientras nada más profundo en el agua? ¿O su fuerza de flotación permanecerá igual a mayores profundidades? Defiende tu respuesta y compárala con tu respuesta a la pregunta anterior.
81. La densidad de una roca no cambia cuando se sumerge en agua, pero tu densidad cambia cuando estás sumergido. Explica.
82. El peso del cerebro humano es de aproximadamente 15 N. La fuerza de flotación proporcionada por el líquido que rodea el cerebro es de más o menos 14.5 N. ¿Esto significa que el peso del líquido que rodea al cerebro es de al menos 14.5 N? Defiende tu respuesta.
83. Un barco que navega desde el océano hacia un puerto en agua dulce se hunde ligeramente más profundo en el agua. ¿La fuerza de flotación sobre el barco cambia? Si es así, ¿aumenta o disminuye?
84. Las densidades relativas del agua, el hielo y el alcohol son 1.0, 0.9 y 0.8, respectivamente. ¿Los cubos de hielo flotan más alto o más bajo en una bebida alcohólica mezclada? Comenta acerca de los cubos de hielo sumergidos en el fondo de un cóctel.
85. Cuando un cubo de hielo se funde en un vaso con agua, ¿el nivel del agua en el vaso se eleva, desciende o permanece igual? ¿Tu respuesta cambia si el cubo de hielo tiene muchas burbujas de aire? ¿Y si el cubo de hielo contiene muchos granos de arena pesada?
86. Cuando un bloque de madera se coloca en el vaso de precipitados, ¿qué sucede con la lectura de la báscula? Responde la misma pregunta para un bloque de hierro.



87. Una góndola en la Falkirk Wheel transporta un bote de 50 ton, mientras que la otra transporta un bote de 100 ton. ¿Por qué las góndolas no obstante pesan lo mismo?
88. Considera tanto un bote de 50 ton como un bote de 100 ton que flotan lado a lado en la góndola de la Falkirk Wheel, mientras la góndola opuesta no transporta botes. ¿Por qué las góndolas no obstante pesan lo mismo?
89. Una pequeña pecera llena a la mitad con agua está sobre un dinamómetro. ¿La lectura del dinamómetro aumentará o permanecerá igual si un pez se coloca en la pecera? (¿Tu respuesta será diferente si la pecera inicialmente está llena hasta el borde?)
90. ¿Qué experimentarías al nadar en agua en un hábitat espacial en órbita donde la gravedad simulada es *g*? ¿Flotarías en el agua como lo haces en la Tierra?
91. Se dice que la forma de un líquido es la misma que la forma de su recipiente. Pero, sin recipiente ni gravedad, ¿cuál es la forma natural de una gota de agua? ¿Por qué?
92. Si sueltas una pelota de ping-pong bajo la superficie del agua, ésta se elevará a la superficie. ¿Haría lo mismo si estuviera adentro de una gran gota de agua que flota ingrávida en una nave espacial en órbita?
93. De modo que tienes una racha de mala suerte y te introduces tranquilamente en un pequeño estanque en calma donde cocodrilos hambrientos escondidos en el fondo se apoyan en el principio de Pascal para ayudarse a detectar una indefensa presa. ¿Qué tiene que ver el principio de Pascal con su deleite a tu llegada?
94. En el arreglo hidráulico que se muestra, el pistón más grande tiene un área que es 50 veces la del pistón más pequeño. El hombre fuerte espera ejercer suficiente fuerza sobre el pistón grande para elevar los 10 kg que



descansan sobre el pistón pequeño. ¿Crees que tendrá éxito? Defiende tu respuesta.

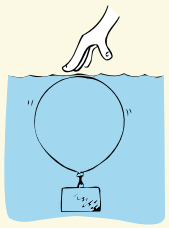
95. En el arreglo hidráulico que se muestra en la Figura 13.22, la multiplicación de fuerza es igual a la razón de las áreas de los pistones grande y pequeño. Algunas personas se sorprenden cuando ven que el área de la superficie del líquido en el depósito del arreglo que se muestra en la Figura 13.23 es irrelevante. ¿Cuál es tu explicación para resolver esta confusión?
96. ¿Por qué el agua caliente fluirá con más facilidad que el agua fría por las pequeñas fugas del radiador de un automóvil?
97. Un pequeño clip de papel seco descansa sobre la superficie de agua en reposo. ¿Por qué un clip más pesado no puede hacer lo mismo sin hundirse?
98. Un trozo de acero se hundirá en el agua. Pero una navaja de afeitar de acero, colocada cuidadosamente sobre la superficie del agua, no se hundirá. ¿Cuál es tu explicación?

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

99. La fotografía muestra al maestro de física Marshall Ellenstein caminando descalzo sobre botellas de vidrio rotas en su salón de clase. Discute el concepto físico que demuestra Marshall. ¿Por qué tiene cuidado de que las piezas rotas sean pequeñas y numerosas? (¡Las curitas en sus pies son por sentido del humor!)

100. Discute cuál tetera contiene más líquido y por qué.

101. Hay una leyenda de un niño holandés que contuvo con valor todo el Mar del Norte al tapar con su dedo un agujero en un dique. Discute si esto es o no posible y razonable. (Consulta también el Piensa y resuelve 41.)
102. Hay una historia acerca de un asistente de Pascal que subió una escalera y vertió un pequeño recipiente de agua en un tubo vertical, alto y delgado, insertado en un barril de madera lleno de agua al pie de la escalera. El barril explotó cuando el agua del tubo llegó aproximadamente a 12 m. Esto fue muy intrigante, porque el peso del agua agregada en el tubo era muy pequeño. Discute y explica.
103. Supón que quieres tender un cimiento plano para una casa en un terreno montañoso y espeso de vegetación. Discute cómo podrías usar una manguera llena de agua para determinar iguales elevaciones en puntos distantes.
104. Un trozo de hierro colocado sobre un bloque de madera hace que el bloque flote más bajo en el agua. Si en vez de ello el hierro se suspendiera bajo la madera, ¿la madera flotaría tan bajo, más bajo o más alto? Discute.
105. Comparado con un barco vacío, ¿un barco repleto con una carga de espuma de estireno se hundiría más profundo en el agua o se elevaría en el agua? Discute.
106. Si un submarino comienza a hundirse, ¿seguirá hundiéndose hasta el fondo si no se hacen cambios? Discute.
107. Una barcaza llena con chatarra de hierro está en una esclusa. Si el hierro se tira por la borda, ¿el nivel del agua al lado de la esclusa se eleva, desciende o permanece igual? ¡Esto es tema para una buena discusión!
108. ¿El nivel del agua en una esclusa subiría o bajaría si una nave de guerra se hunde en la esclusa? Otra buena discusión.
109. Un globo se carga con pesas de modo que apenas puede flotar en agua. Si se empuja bajo la superficie, ¿regresará a la superficie, permanecerá en la profundidad a la que se empuja o se hundirá? En tu discusión, considera cualquier cambio en la densidad del globo.



110. Supón que te dan a escoger entre dos chalecos salvavidas que son idénticos en tamaño, el primero es uno ligero con relleno de espuma de estireno y el segundo es uno muy pesado con relleno de grava. Si sumerges estos chalecos salvavidas en el agua, ¿sobre cuál será mayor la fuerza de flotación? ¿Sobre cuál no será efectiva la fuerza de flotación? Discute por qué tus respuestas son diferentes.
111. En un paseo en bote, el capitán te entrega un chaleco salvavidas extra grande con relleno de bolitas de plomo. Cuando ve el escepticismo en tu rostro, dice que, si caes por la borda, experimentarás mayor fuerza de flotación que tus amigos que usan chalecos salvavidas de tamaño normal rellenos de espuma de estireno. ¿Dice la verdad?
112. Greta Novak es invitada a la notable flotación en el muy salado Mar Muerto. ¿Cómo se compara la fuerza de flotación sobre ella cuando flota en agua dulce? Para responder esta pregunta, discute las diferencias en el volumen del agua desplazada en los dos casos.

113. ¿Ocurriría flotación en ausencia de peso? Discute la flotación que ocurriría o no ocurriría en la Estación Espacial Internacional.
114. Si el campo gravitacional de la Tierra aumentara, ¿un pez flotaría a la superficie, se hundiría o permanecería a la misma profundidad?

# 14

CAPÍTULO 14

# Gases


14.1 La atmósfera

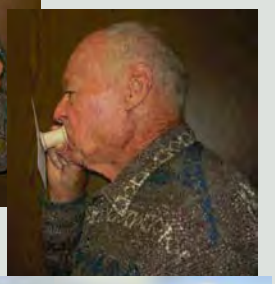
14.2 Presión atmosférica

14.3 Ley de Boyle

14.4 Flotabilidad del aire

14.5 El principio de Bernoulli

14.6 Plasma



**1** Las fuerzas debidas a la presión atmosférica se muestran muy bien por parte de los profesores suecos de física, padre e hijo, P. O. y Johan Zetterberg, quienes jalan de un modelo pedagógico de los hemisferios de Magdeburgo. **2** Una imagen de la famosa demostración de Otto von Guericke, de 1654, de los hemisferios de Magdeburgo originales, los cuales, cuando se vaciaron de aire, no pudieron separarlos dos equipos de caballos. **3** Con un carrete y un trozo de cartón, Evan Jones juega con Bernoulli. Cuando sopla por el orificio del carrete y reduce la presión del aire entre la tarjeta y el carrete, la presión atmosférica sobre la parte exterior de la tarjeta la empuja hacia adentro. (Si lo intentas, pincha con un alfiler a través del punto medio de la tarjeta para dar estabilidad.) **4** Ole Anton Haugland, de rodillas, anima a sus profesores de física noruegos en capacitación a que construyan globos aerostáticos con papel de seda.

La física está establecida firmemente en el sistema educativo del sur de Suecia. Una aportación importante a ello ha sido el esfuerzo pedagógico de Per Olof Zetterberg, de la Lund University. Per Olof, conocido simplemente como P.O., sostiene que el primer curso universitario de un estudiante de física debe ser una experiencia agradable. Es correcto: *agradable*. Por ser agradable, su clase ha inspirado a muchos estudiantes a especializarse en física, quienes de otro modo quizá no lo hubiesen hecho. P.O. presenta la física a los alumnos principiantes como "primero fascinación; luego, rigor… cuando estén preparados". P.O. trabaja con su hijo Johan, también doctorado en física, reciente adquisición del personal docente de la Lund University. Este equipo padre e hijo, que juguetonamente jalan sobre los hemisferios de Magdeburgo, como se muestra en la fotografía al inicio del capítulo, acompañados por la prometida de Johan, la física Sara Blomberg, forman un impresionante equipo Lund que fomenta el aprecio público por la física. El equipo promueve aún más este aprecio con

la presentación de demostraciones de física enriquecidas con actividades de luz láser a comunidades dentro y fuera de Suecia. Su lema es "¡Tienen física, viajaremos!". Con su dedicación a la enseñanza de la física, auxiliado por su buena energía, el equipo Lund contribuye a que la física esté vivita y coleando en Escandinavia.

## 14.1 La atmósfera

El grosor de la atmósfera está determinado por dos factores contrarios: la energía cinética de sus moléculas, que tiende a dispersar las moléculas, y la gravedad, que tiende a mantenerlas cerca de la Tierra. Si de algún modo pudiera desconectarse la gravedad de la Tierra, las moléculas atmosféricas se disiparían y desaparecerían. O si la gravedad actuara pero las moléculas se movieran con mucha lentitud para formar un gas (como puede ocurrir en un remoto planeta frío), la "atmósfera" sería una capa líquida o sólida, pues mucha más materia reposaría en el suelo. No habría nada que respirar. La atmósfera te mantiene vivo y caliente, y sin ella, perecerías en minutos.

Así es, 99% de la atmósfera de la Tierra está por abajo de una altitud de 30 km (sólo 0.5% del radio de la Tierra).

Pero la atmósfera es un feliz término medio entre las moléculas energéticas que tienden a huir y la gravedad que las retiene. Sin energía solar, las moléculas de aire yacerían en la superficie de la Tierra de la forma en que las rosetas de maíz se asientan en el fondo de una máquina de rosetas. Pero, si se agrega calor a las rosetas de maíz y a los gases atmosféricos, ambos retomarían su camino de ascenso a mayores altitudes. Las rosetas de maíz en una máquina alcanzan rapideces de algunos kilómetros por hora y llegan a alturas de hasta un metro o dos; las moléculas en el aire se mueven con rapideces de aproximadamente 1,600 kilómetros por hora y alcanzan muchos kilómetros de altura. Por fortuna, hay un Sol energizante, hay gravedad y la Tierra tiene atmósfera.

La altura exacta de la atmósfera no tiene un significado real porque el aire se hace cada vez más y más delgado cuanto más alto suba uno. Al final, se adelgaza hasta el vacío en el espacio interplanetario. Sin embargo, incluso en las regiones vacías del espacio interplanetario hay una densidad de gas de aproximadamente una molécula por centímetro cúbico. Éste es principalmente hidrógeno, el elemento más abundante del Universo. Alrededor de 50% de la atmósfera está por debajo de una altitud de 5.6 km (18,000 ft), 75% está por debajo de 11 km (36,000 ft), 90% está por debajo de 18 km (60,000 ft) y 99% está por debajo

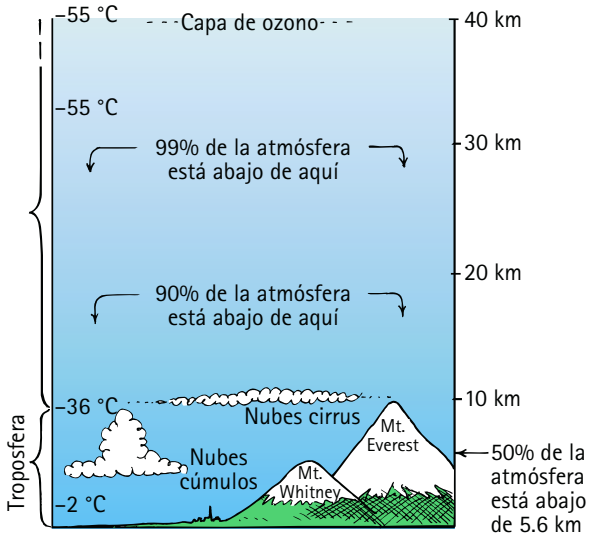



**FIGURA 14.1**
La atmósfera. El aire está más comprimido a nivel del mar que a mayores altitudes. Como las plumas en una enorme pila, lo que está en el fondo está más apretado que lo que está más cerca de la parte superior.

de alrededor de 30 km (100,000 ft) (Figura 14.1). En varios sitios web puedes encontrar una descripción detallada de la atmósfera.

**pti**

- Los gases y los líquidos fluyen; por tanto, ambos se llaman *fluidos*. Un gas se expande de manera indefinida y llena todo el espacio que tiene a su disposición. Sólo cuando la cantidad de gas es muy grande, como en la atmósfera de un planeta o una estrella, las fuerzas gravitacionales restringen el tamaño o la forma de un gas.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Por qué a veces tus oídos se tapan cuando cambias de altitud, por decir, en el elevador de un rascacielos o al descender en un avión?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Un cambio de altitud significa un cambio en la presión del aire, como se estudia en la siguiente sección, y esto causa un desequilibrio temporal en las presiones sobre los dos lados de tu tímpano.

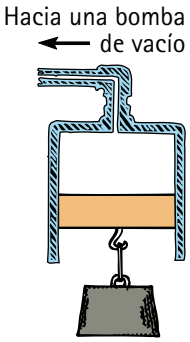



**FIGURA 14.2**
¿El pistón que soporta la carga es jalado o empujado hacia arriba?

## 14.2 Presión atmosférica

La humanidad vive en el fondo de un océano de aire. La atmósfera, muy parecida al agua de un lago, ejerce presión. Por ejemplo, cuando se reduce la presión del aire dentro de un cilindro como el que se muestra en la Figura 14.2, hay una fuerza ascendente sobre el pistón procedente del aire exterior. Esta fuerza es suficientemente grande como para levantar un gran peso. Si el diámetro interior del cilindro es de 10 cm o más, una persona puede quedar suspendida por esta fuerza.

Contrario a la creencia común, lo que el experimento de la Figura 14.2 *no* muestra es la "fuerza de succión". Si se dice que hay una fuerza de succión, entonces se supone que un vacío puede ejercer una fuerza. ¿Pero qué es un vacío? Es ausencia de materia; es una condición de nada. ¿Cómo la nada puede ejercer una fuerza? El pistón que sostiene el peso en la Figura 14.2 no es succionado hacia arriba. El pistón es empujado hacia arriba por el peso de la atmósfera contra su superficie inferior.

Así como la presión del agua es causada por el peso del agua, la **presión atmosférica** es causada por el peso del aire. Las personas se han adaptado tan completamente al aire invisible que no lo sienten y en ocasiones se olvidan que tiene peso. Quizás un pez "olvida" el peso del agua en la misma forma. La razón por la que no sienten que este peso presiona contra su cuerpo es que la presión en el interior de su cuerpo equilibra la presión del aire circundante. No hay una fuerza neta que sentir.

A nivel del mar, 1 $m^3$ de aire tiene una masa aproximada de 1.25 kg. ¡De modo que el aire en la recámara de tu hermana menor pesa aproximadamente tanto como ella! La densidad del aire disminuye con la altitud. A 10 km, por ejemplo, 1 $m^3$ de aire tiene una masa de aproximadamente 0.4 kg. Para compensar esto, los aviones están presurizados; el aire adicional necesario para presurizar por completo un moderno jumbo jet,

**pti**

- Muchas criaturas de las profundidades marinas experimentan enormes presiones de agua sobre su cuerpo, pero no sufren efectos dañinos. Como tú en el fondo de la atmósfera de la Tierra, ninguna fuerza o tensión neta se ejercen sobre ellos porque las presiones dentro de sus cuerpos coinciden con la presión de fluido a su alrededor. Para muchas criaturas, mas no para todas, los problemas ocurren cuando cambian de profundidad muy súbitamente. Los buzos, por ejemplo, que cometen el error de subir a la superficie muy rápidamente experimentan dolor y pueden morir por la rápida descompresión, un trastorno conocido como "enfermedad de los buzos" (síndrome de descompresión). [El término inglés *Scuba* (escafandra) es un acrónimo de *Self-contained Underwater Breathing Apparatus*: aparato de respiración subacuática autónomo.] Los biólogos marinos buscan métodos para llevar a la superficie a las criaturas de las profundidades marinas, sensibles a la profundidad, sin matarlas.

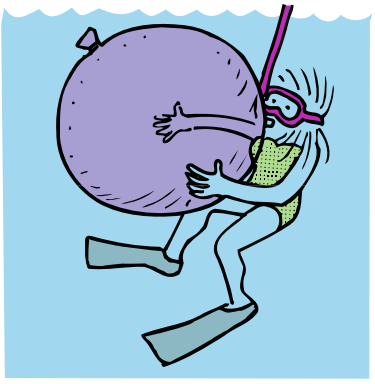


**FIGURA 14.3**
No percibes el peso de una bolsa de agua mientras estás sumergido en agua. De igual modo, no estás consciente del peso del aire mientras estás sumergido en un "océano" de aire.

por ejemplo, es de más de 1,000 kg. El aire es pesado si tienes suficiente de él. Si tu hermana menor no cree que el aire tenga peso, le puedes demostrar por qué ella percibe falsamente que el aire no tiene peso. Si le das una bolsa de plástico llena de agua, te dirá que tiene peso. Pero, si le das la misma bolsa de agua mientras está sumergida en una alberca, no sentirá su peso. Eso se debe a que ella y la bolsa están rodeadas de agua. Lo mismo sucede con el aire que te rodea.

Piensa en la masa de aire en un poste de bambú erguido de 30 km de alto que tiene un área transversal interior de 1 $cm^2$. Si la densidad del aire en el interior del poste coincide con la densidad del aire exterior, la masa de aire encerrado sería de aproximadamente 1 kg. El peso de todo este aire es de cerca de 10 N. De modo que la presión del aire en el fondo del poste de bambú sería de unos 10 N por centímetro cuadrado (10 $N/cm^2$). Desde luego, lo mismo es cierto sin el poste de bambú. Hay 10,000 $cm^2$ en 1 $m^2$, de modo que una columna de aire de 1 $m^2$ de sección transversal que se extiende hacia arriba a través de la atmósfera tiene una masa de aproximadamente 10,000 kg. El peso de este aire es de más o menos 100,000 N ($10^5$ N). Este peso produce una presión de 100,000 $N/m^2$ o, de manera equivalente, 100,000 pascales o 100 kilopascales. Para ser más exactos, la presión atmosférica promedio a nivel del mar es de 101.3 kilopascales (101.3 kPa).[1]

La presión de la atmósfera no es uniforme. Además de las variaciones con la altitud, la presión atmosférica varía de una ubicación a otra y de un día a otro. Esto conduce a frentes climáticos en movimiento y a tormentas que conforman el clima. Cuando se aproxima un sistema de alta presión, puedes esperar temperaturas más frías y cielos despejados. Cuando se aproxima un sistema de baja presión, espera un clima más cálido, lluvia y tormentas. La medición de los cambios de la presión del aire es importante para los meteorólogos cuando predicen el clima.

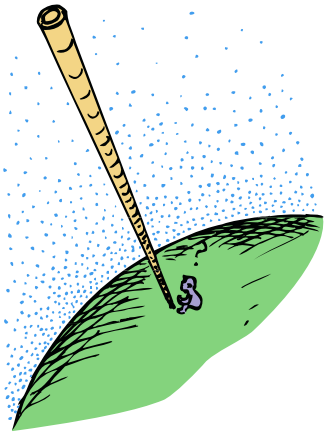


**FIGURA 14.4**
La masa de aire que ocuparía un poste de bambú que se extiende 30 km hacia arriba, hasta la "parte superior" de la atmósfera, es de aproximadamente 1 kg. Este aire pesa aproximadamente 10 N.

**SCREENCAST: Presión atmosférica**

**FIGURA 14.5**
Ann Brandon fascina a sus estudiantes cuando viaja sobre un colchón de aire al que le sopla por un orificio en medio de este gran disco de aire.

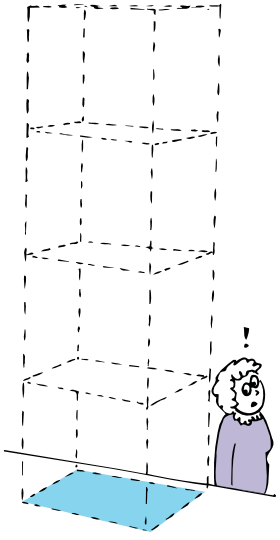


**FIGURA 14.6**
El peso del aire que soporta una superficie de 1 $m^2$ a nivel del mar es de aproximadamente 100,000 N. En otras palabras, la presión atmosférica es de más o menos $10^5$ $N/m^2$, o alrededor de 100 kPa.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Aproximadamente cuántos kilogramos de aire ocupan un salón de clase que tiene 200 $m^2$ de área de suelo y un techo de 4 m de alto? (Supón una temperatura fría de 10°C.)**
2. **¿Por qué la presión de la atmósfera no rompe ventanas?**

**VIDEO: El aire tiene peso**

**VIDEO: El aire es materia**

[1]El pascal (1 $N/m^2$) es la unidad del SI de presión. La presión promedio a nivel del mar (101.3 kPa) con frecuencia se llama 1 atmósfera. En unidades británicas, la presión atmosférica promedio a nivel del mar es 14.7 $lb/in^2$.

**TABLA 14.1**
**DENSIDADES DE VARIOS GASES**

| Gas | Densidad (kg/m³)* |
|---|---|
| Aire seco | |
| 0°C | 1.29 |
| 10°C | 1.25 |
| 20°C | 1.21 |
| 30°C | 1.16 |
| Hidrógeno | 0.090 |
| Helio | 0.178 |
| Nitrógeno | 1.25 |
| Oxígeno | 1.43 |

*A presión atmosférica a nivel del mar y 0°C (a menos que se especifique de otro modo).

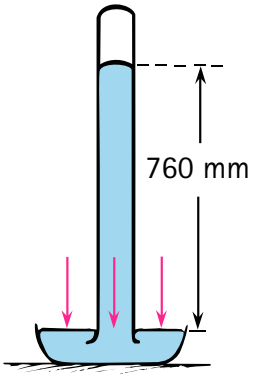



**FIGURA 14.7**
Un barómetro de mercurio simple.

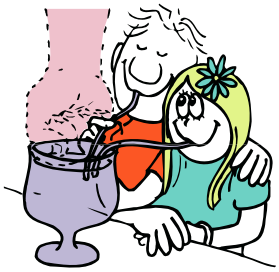


**FIGURA 14.8**
Estrictamente hablando, estos dos no succionan la gaseosa por las pajillas (popotes). Más bien, reducen la presión en las pajillas y permiten que el peso de la atmósfera empuje el líquido hacia arriba de las pajillas. ¿Podrían beber una gaseosa de esta forma en la Luna?

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. A temperatura normal del salón de clase, la masa de aire es 1,000 kg. El volumen del aire es área × altura = 200 $m^2$ × 4 m = 800 $m^3$; cada metro cúbico de aire tiene una masa aproximada de 1.25 kg, de modo que 800 $m^3$ × 1.25 kg/$m^3$ = 1,000 kg.
2. La presión atmosférica se ejerce sobre ambos lados de una ventana, de modo que sobre el vidrio no se ejerce fuerza neta. Si, por alguna razón, la presión se redujera o aumentara sólo en un lado, como cuando pasa un tornado, ¡entonces cuidado! La reducción de la presión de aire exterior creada por un tornado puede ser desastrosa.

## El barómetro

En 1643, el físico y matemático italiano Evangelista Torricelli descubrió una forma de medir la presión que ejerce el aire: inventó el primer **barómetro**. En la Figura 14.7 se ilustra un barómetro de mercurio simple. Consiste en un tubo de vidrio lleno de mercurio, un poco más largo que 76 cm, sumergido en un plato (depósito) de mercurio. Cuando Torricelli volteó de cabeza el tubo lleno de mercurio y colocó la boca hacia abajo en un plato de mercurio, el mercurio del tubo descendió a un nivel donde su peso en el tubo se equilibró con la fuerza atmosférica ejercida sobre el depósito. El espacio vacío atrapado arriba, excepto por algo de vapor de mercurio, es un vacío. La altura vertical de la columna de mercurio permanece constante aun cuando el tubo se incline, a menos que la parte superior del tubo esté a menos de 76 cm sobre el nivel del plato, en cuyo caso el mercurio llena por completo el tubo.

El equilibrio del mercurio en un barómetro es similar a la manera en que un subibaja se equilibra cuando los momentos de torsión de las personas en sus dos extremos son iguales. El barómetro se "equilibra" cuando el peso del líquido en el tubo ejerce la misma presión que la atmósfera exterior. Cualquiera sea el ancho del tubo, una columna de 76 cm de mercurio pesa lo mismo que el aire que llenaría un tubo súper alto de 30 km del mismo ancho. Si la presión atmosférica aumenta, entonces la atmósfera empuja hacia abajo con más fuerza sobre el mercurio y la columna de mercurio es empujada más alto que 76 cm. El mercurio literalmente es empujado hacia adentro del tubo de un barómetro por el peso de la atmósfera. La presión atmosférica se midió por la altura de una columna de mercurio en un barómetro, y con frecuencia todavía se expresa en milímetros o pulgadas de mercurio. La unidad científica más común es el kilopascal.

¿Podría usarse agua para fabricar un barómetro? La respuesta es *sí*, pero el tubo de vidrio tendría que ser mucho más largo: 13.6 veces más largo, para ser exactos. Puedes reconocer este número como la densidad del mercurio en relación con la del agua. Para obtener el mismo peso que el mercurio del tubo se necesita un volumen de agua 13.6 veces el del mercurio. De modo que el tubo tendría que ser al menos 13.6 veces más alto que la columna de mercurio. Un barómetro de agua tendría que medir 13.6 × 0.76 m, o 10.3 m de alto, muy alto para ser práctico.

Lo que ocurre en un barómetro es similar a lo que sucede durante el proceso de beber por una pajilla. Al succionar en las pajillas colocadas en la bebida, reduces la presión del aire en la pajilla. El peso de la atmósfera sobre la bebida empuja el líquido hacia arriba, hacia la región con presión reducida en el interior de la pajilla. Estrictamente hablando, el líquido no se succiona; lo empuja hacia arriba la presión de la atmósfera. Si se impide que la atmósfera presione sobre la superficie de la bebida, como en la botella de truco con la pajilla que pasa a través de un tapón de corcho hermético, uno puede succionar y succionar y no obtener la bebida.

Si entiendes estas ideas, puedes comprender por qué hay un límite de 10.3 m en la altura a la que puede levantarse el agua con bombas de vacío. Las bombas antiguas de las haciendas, como la que se muestra en la Figura 14.9, funcionan mediante la producción de un vacío parcial en una tubería que se extiende hacia los mantos acuíferos

**FIGURA 14.9**
La atmósfera empuja el agua desde abajo hacia una tubería que es parcialmente evacuada de aire por la acción de bombeo.

**FIGURA 14.10**
Un barómetro aneroide (arriba) y su sección transversal (abajo).

Cuando se bombea de la manija, el aire en la tubería se "adelgaza" mientras se expande para llenar un volumen más grande. La presión atmosférica sobre la superficie del pozo empuja el agua hacia arriba por la tubería, lo que hace que el agua se desborde por el pico.

bajo ella. El peso de la atmósfera sobre la superficie del agua simplemente empuja el agua hacia la región donde se redujo la presión en el interior de la tubería. ¿Puedes ver que, incluso con un vacío perfecto, la altura máxima a la que puede elevarse el agua es de 10.3 m?

Un pequeño instrumento portátil que mide la presión atmosférica es el *barómetro aneroide*. El modelo clásico que se muestra en la Figura 14.10 usa una caja metálica que está parcialmente vacía de aire y tiene una tapa un poco flexible que se dobla adentro o afuera con los cambios de la presión atmosférica. El movimiento de la tapa se indica en una escala con un sistema mecánico de resorte y palanca. Dado que la presión atmosférica disminuye con la altitud, un barómetro puede usarse para determinar la elevación. Un barómetro aneroide calibrado para medir la altitud se denomina *altímetro* (medidor de altitud). Algunos altímetros son suficientemente sensibles para indicar un cambio de elevación de menos de un metro.

Los vacíos se producen con bombas, que funcionan en virtud de un gas que tiende a llenar su depósito. Si se proporciona un espacio con menos presión, el gas fluirá desde la región de mayor presión hasta la región de menor presión. Una bomba de vacío simplemente proporciona una región de menor presión hacia la cual se mueven al azar las rápidas moléculas de gas. La presión del aire disminuye en forma repetida mediante la acción de un pistón y una válvula (Figura 14.11). Los mejores vacíos alcanzables con bombas mecánicas son de aproximadamente 1 Pa. Los mejores vacíos, abajo de $10^{-8}$ Pa, se logran con bombas de difusión de vapor o de chorro de vapor. Las bombas de sublimación pueden alcanzar $10^{-12}$ Pa. Vacíos más grandes son muy difíciles de lograr.

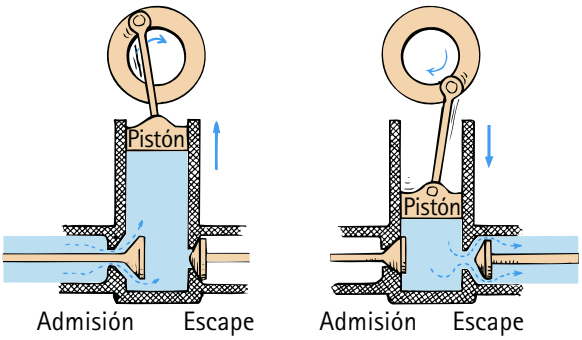



**FIGURA 14.11**
Una bomba de vacío mecánica. Cuando el pistón se levanta, la válvula de admisión se abre y el aire entra para llenar al espacio vacío. Cuando el pistón se desplaza hacia abajo, la válvula de escape se abre y el aire se empuja hacia afuera. ¿Qué cambios harías para convertir esta bomba en un compresor de aire?

**pti**

- Para los vuelos internacionales, una presión de cabina de tres cuartos la presión atmosférica normal es lo mínimo permitido.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Cuál es la máxima altura a la que puede succionarse agua por una pajilla?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

A nivel del mar, por más fuertes que sean tus pulmones, o cualquier dispositivo que uses para crear un vacío en la pajilla, la atmósfera no puede empujar el agua más alto que 10.3 m.

## 14.3 Ley de Boyle

La presión del aire en el interior de los neumáticos inflados de un automóvil es mucho mayor que la presión atmosférica externa. La densidad del aire adentro también es mayor que la densidad del aire exterior. Para entender la relación entre *presión* y *densidad*, piensa en las moléculas de aire (principalmente nitrógeno y oxígeno) dentro del neumático, que se comportan como pequeñas pelotas de ping-pong: se mueven en forma continua sin orden ni concierto y chocan entre sí y contra las paredes interiores. Sus impactos producen una fuerza muy agitada que a tus sentidos parece como un empuje constante. Esta fuerza de empuje promediada sobre una unidad de área proporciona la presión del aire encerrado.

Supón que hay el doble de moléculas en el mismo volumen (Figura 14.12). Entonces la densidad del aire se duplica. Si las moléculas se mueven con la misma rapidez promedio o, de manera equivalente, si tienen la misma temperatura, entonces el número de colisiones se duplica. Esto significa que la presión se duplica. De modo que la presión es proporcional a la densidad.

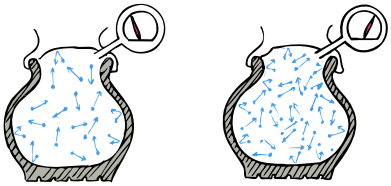


**FIGURA 14.12**
Cuando la densidad del gas de los neumáticos aumenta, la presión se incrementa.

¿La presión atmosférica realmente difiere con algunos centímetros de diferencia en altitud? El hecho de que sí lo es se demuestra con cualquier globo lleno de helio que se eleva en el aire. La presión atmosférica ascendente contra la superficie inferior del globo es mayor que la presión atmosférica descendente contra la parte superior.

**VIDEO:** El aire tiene presión

**pti**

Un manómetro de presión de aire en una estación de servicio no mide la presión absoluta de aire. Un neumático ponchado registra una presión cero en el manómetro, pero ahí existe una presión de aproximadamente 1 atmósfera. Los manómetros leen la presión "manométrica": una presión mayor que la presión atmosférica.

**SCREENCAST:** Ley de Boyle

También puedes duplicar la densidad del aire si comprimes el aire a la mitad de su volumen. Considera el cilindro con el pistón móvil de la Figura 14.13. Si el pistón se baja, de modo que el volumen sea la mitad del volumen original, la densidad de las moléculas se duplica y la presión se duplica en correspondencia. Reduce el volumen a un tercio de su valor original y la presión aumenta por tres, y así sucesivamente (siempre que la temperatura permanezca constante y el número de moléculas permanezca igual).

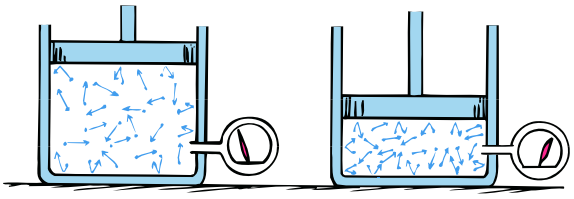


**FIGURA 14.13**
Cuando el volumen de gas disminuye, su densidad, y por tanto su presión, aumentan.

Observa en este ejemplo con pistones que *presión y volumen son inversamente proporcionales*; si duplicas uno, por ejemplo, reduces el otro a la mitad.[2] Esto se puede escribir como:

$$P \quad \frac{1}{V}$$

donde $P$ representa presión y $V$ volumen. Esta relación puede escribirse como:

$$PV = \text{constante}$$

Otra forma de expresarlo es:

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

Aquí, $P_1$ y $V_1$ representan la presión y volumen originales, respectivamente, y $P_2$ y $V_2$ representan la segunda presión y volumen. O, puesto de manera más gráfica,

$$_PV = PV$$

Esta relación entre la presión y el volumen se llama **ley de Boyle**, en honor al físico Robert Boyle, quien, con la ayuda de su amigo físico Robert Hooke, hizo este descubrimiento en el siglo XVII. La ley de Boyle se aplica a los gases ideales. Un gas ideal es aquel en el que los efectos perturbadores de las fuerzas entre moléculas y el tamaño finito de las moléculas individuales pueden despreciarse. El aire y otros gases bajo presiones normales se aproximan a condiciones de gas ideal.

[2]Una ley general que tiene en cuenta los cambios de temperatura es $P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2$, donde $T_1$ y $T_2$ representan las temperaturas *absolutas* primera y segunda, medidas en la unidad del SI llamada *kelvin* (consulta los Capítulos 15 y 18).

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Un pistón de una bomba hermética se retira de modo que el volumen de la cámara de aire aumenta tres veces. ¿Cuál es el cambio de presión?**
2. **Un buzo a 10.3 m de profundidad respira aire comprimido. Si tuviera que contener su respiración mientras regresa a la superficie, ¿en cuánto tendería a aumentar el volumen de sus pulmones?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La presión en la cámara del pistón se reduce a un tercio. Éste es el principio que subyace a una bomba de vacío mecánica.
2. La presión atmosférica puede soportar una columna de agua de 10.3 m de alto, de modo que la presión en el agua debida a su peso sólo iguala la presión atmosférica a una profundidad de 10.3 m. Si se tiene en cuenta la presión de la atmósfera en la superficie del agua, la presión total a esta profundidad es el doble de la presión atmosférica. Por desgracia para el buzo, sus pulmones tenderán a inflarse al doble de su tamaño normal si retiene su respiración mientras sube a la superficie. Una primera lección en el buceo es no retener la respiración cuando asciendes. Hacerlo puede ser mortal.

Los trabajadores en construcciones submarinas laboran en un ambiente de aire comprimido. La presión del aire en sus cámaras submarinas es al menos tan alta como la presión combinada del agua y la atmósfera exterior.

## 14.4 Flotabilidad del aire

Un cangrejo vive en el fondo de su océano de agua y mira hacia arriba una medusa que flota sobre él. De igual modo, tú vives en el fondo de un océano de aire y miras hacia arriba los globos que flotan sobre ti. Un globo está suspendido en el aire y una medusa está suspendida en el agua por la misma razón: cada uno flota hacia arriba por un peso desplazado de fluido igual a su propio peso. En un caso, el fluido desplazado es aire; en el otro caso, es agua. Como estudiaste en el Capítulo 13, los objetos en el agua flotan hacia arriba porque la presión que actúa hacia arriba contra la parte de abajo del objeto supera la presión que actúa hacia abajo contra la parte de arriba. De manera similar, la presión del aire que actúa hacia arriba contra un objeto en el aire es mayor que la presión arriba que empuja hacia abajo. La flotabilidad, en ambos casos, es numéricamente igual al peso del fluido desplazado. El **principio de Arquímedes** se sostiene para el aire tal como lo hace para el agua:

**Un objeto rodeado de aire es sostenido por una fuerza igual al peso del aire desplazado.**

Se sabe que un metro cúbico de aire a presión atmosférica ordinaria y temperatura ambiente tiene una masa de aproximadamente 1.2 kg, de modo que su peso es de más o menos 12 N. Por ende, cualquier objeto de 1 $m^3$ en el aire es sostenido con una fuerza de 12 N. Si la masa del objeto de 1 $m^3$ es mayor que 1.2 kg (de modo que su peso es mayor que 12 N), cae al suelo cuando se lo suelta. Si un objeto de este tamaño tiene una masa menor que 1.2 kg, se eleva en el aire. Cualquier objeto que tenga una masa menor que la masa de un volumen igual de aire se elevará en el aire. Otra forma de decir esto es que cualquier objeto menos denso que el aire se elevará en el aire. Los globos llenos de gas que se elevan en el aire son menos densos que el aire.

La mayor flotabilidad se lograría si un globo fuera evacuado, pero esto no es práctico. El peso de una estructura necesaria para evitar el colapso de un globo evacuado contrarrestaría más de la cuenta la ventaja de la flotabilidad adicional. De modo que los globos se llenan con un gas menos denso que el aire ordinario, lo que evita que el globo colapse al tiempo que se mantiene ligero. En los globos deportivos, el gas es simplemente aire caliente. En los globos hechos para alcanzar muy grandes alturas o para permanecer arriba un tiempo prolongado, por lo general se usa helio. Su densidad es suficientemente baja, de modo que el peso combinado del helio, el globo y cualquiera

**VIDEO: Flotabilidad del aire**

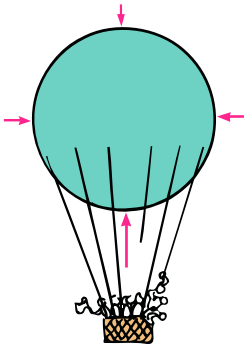


**FIGURA 14.14**
Todos los cuerpos son sostenidos por una fuerza igual al peso del aire que desplazan. ¿Por qué entonces no todos los objetos flotan como este globo?

**SCREENCAST: Flotabilidad de globos**

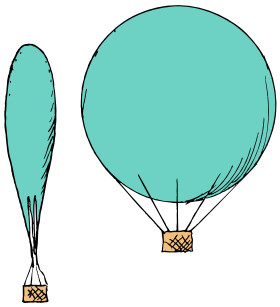


**FIGURA 14.15**
(Izquierda) A nivel del suelo, el globo está parcialmente inflado. (Derecha) El mismo globo está totalmente inflado a grandes alturas, donde la presión circundante es menor.

que sea la carga es menor que el peso del aire que desplaza.[3] En un globo se usa gas de baja densidad por la misma razón que en el chaleco salvavidas de un nadador se usan corcho o espuma de estireno. El corcho o la espuma de estireno no poseen una tendencia extraña para ser arrastrados hacia la superficie del agua, y el gas no posee una tendencia extraña para elevarse. Ambos flotan hacia arriba como cualquier otra cosa. Son simplemente lo bastante ligeros como para que la flotabilidad sea significativa.

A diferencia del agua, la atmósfera no tiene una superficie definible. No hay "arriba". Más aún, a diferencia del agua, la atmósfera se vuelve menos densa con la altitud. Mientras que el corcho flota hacia la superficie del agua, un globo lleno de helio que se suelta no se elevará hacia ninguna superficie atmosférica. ¿Qué tan alto subirá un globo? La respuesta se puede indicar de varias formas. Un globo lleno de gas se elevará sólo en tanto desplace un peso de aire mayor que su propio peso. Puesto que el aire se vuelve menos denso con la altitud, a medida que el globo se eleva desplaza un peso de aire menor por volumen dado. Ya que la mayoría de los globos se expande cuando se elevan, su flotabilidad permanece bastante constante hasta que ya no pueden expandirse más. Cuando el peso del aire desplazado es igual al peso total del globo, el movimiento ascendente del globo cesará. También es posible decir que, cuando la fuerza de flotación sobre el globo es igual a su peso, el globo dejará de subir. De manera equivalente, cuando la densidad del globo (incluida su carga) es igual a la densidad del aire circundante, el globo dejará de subir. Los globos de juguete llenos de helio por lo general se rompen cuando se sueltan en el aire porque la expansión del helio que contienen estira el hule hasta que se rompe. Los grandes dirigibles están diseñados para que, cuando se carguen, se eleven lentamente en el aire; esto es: su peso total es un poco menor que el peso del aire desplazado. Cuando está en movimiento, la nave puede subir o bajar mediante "elevadores" horizontales.

Hasta el momento sólo se ha abordado la presión como se aplica a fluidos estacionarios. El movimiento produce una influencia adicional.

**pti**

- Un banco típico de nubes de buen tamaño contiene más o menos un millón de toneladas de agua, todas en forma de gotas de agua suspendidas.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Existe una fuerza de flotación que actúe sobre ti? Si la hay, ¿por qué tú no flotas por esta fuerza?**
2. **(¡Ésta requiere un buen razonamiento!) ¿Cómo cambia la flotabilidad a medida que asciende un globo lleno de helio?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Existe una fuerza de flotación que actúa sobre ti, y tú *eres empujado* hacia arriba por ella. No la aprecias sólo porque tu peso es mucho mayor.
2. Si el globo es libre de expandirse conforme se eleva, el aumento de volumen es contrarrestado por una disminución de la densidad del aire a mayor altitud. Así que, es interesante que el mayor volumen del aire desplazado no pese más, y la flotabilidad permanezca igual. Si un globo no tiene libertad para expandirse, disminuirá la flotabilidad a medida que el globo se eleve, debido a que el aire desplazado es menos denso. Por lo general, al principio los globos se expanden conforme se elevan y, si finalmente no se rompen, el estiramiento de su tela llega a un máximo y se asientan donde su flotabilidad coincide con su peso. Como muestra la Figura 14.15, los globos de grandes alturas parecen estar muy desinflados cuando se les lanza.

**SCREENCAST: Problemas de flotabilidad en aire**

## 14.5 El principio de Bernoulli

Considera un flujo continuo de agua por una tubería. Puesto que el agua no se "amontona", la cantidad de agua que fluye por cualquier sección dada de la tubería es la misma que la cantidad que fluye por cualquiera otra sección de la misma tubería, incluso si la tubería se ensancha o estrecha. Para un flujo continuo, un fluido acelera cuando

**SCREENCAST: El principio de Bernoulli**

[3]El hidrógeno es el gas menos denso y se usó en globos que transportaban pasajeros, desde finales del siglo XVIII hasta mediados del siglo XX. Sin embargo, dado que el hidrógeno es altamente inflamable, como lo demostró el desastre del Hindenburg en 1937, rara vez se usa.

pasa de una parte ancha a una estrecha de la tubería y frena cuando pasa de una parte estrecha a una ancha de la tubería. Esto es evidente en un río ancho que se mueve lento y fluye más rápidamente cuando entra a una garganta estrecha que tenga la misma profundidad. También es evidente cuando el agua que fluye de una manguera acelera cuando oprimes el extremo de la manguera para hacer el chorro más estrecho.

Este cambio de rapidez con el cambio de la sección transversal es consecuencia de lo que se conoce como principio de *continuidad*, que es el tema de los dos recuadros pti de esta página. Para que el flujo sea continuo en una región confinada, acelera cuando se mueve de una región más ancha a una más estrecha.

El movimiento de un fluido en flujo estacionario sigue *líneas de corriente* imaginarias, representadas por líneas delgadas en la Figura 14.17 y en otras figuras que siguen. Las líneas de corriente son trayectorias suaves de fluido. Las líneas están más juntas en regiones más estrechas, donde la rapidez del flujo es mayor. (Las líneas de corriente son visibles cuando el humo u otros fluidos visibles pasan por aberturas uniformemente espaciadas, como en un túnel de viento.)

Daniel Bernoulli, un científico suizo del siglo XVIII, estudió el flujo de fluidos por las tuberías. Su descubrimiento, ahora llamado **principio de Bernoulli**, puede enunciarse del modo siguiente:

**Donde la rapidez de un fluido aumenta, la presión interna del fluido disminuye.**

Y viceversa: donde la rapidez disminuye, la presión interna aumenta. Esto se aplica cuando la fricción, la turbulencia y los cambios de altitud no afectan la presión. El principio se aplica al flujo que sigue su curso continuo por líneas de corriente.

Donde las líneas de corriente de un fluido están más juntas, la rapidez del flujo es mayor y la presión dentro del fluido es menor. Los cambios en la presión interna son evidentes cuando el agua contiene burbujas de aire (Figura 14.18). El volumen de una burbuja de aire depende de la presión del agua circundante. Donde el agua adquiere rapidez, la presión se reduce y las burbujas se vuelven más grandes. En el agua que frena, la presión aumenta y las burbujas se oprimen hasta un tamaño menor.

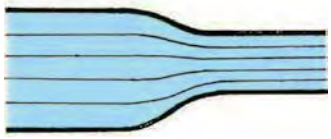


**FIGURA 14.17**
El agua acelera cuando entra en la tubería más estrecha. Las líneas de corriente más juntas indican un aumento de rapidez y una disminución de la presión interna.

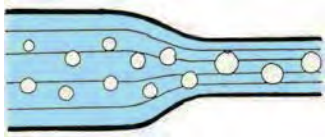


**FIGURA 14.18**
La presión interna es mayor cuando el agua se mueve lentamente en la parte ancha de la tubería, como lo demuestran las burbujas de aire más oprimidas. Las burbujas son más grandes en la parte estrecha porque ahí la presión interna es menor.

Una forma de aumentar en gran medida la presión de un fluido es llevarlo con rapidez al reposo (a lo que se conoce como *presión estática*). Si alguna vez has tenido la mala suerte de ser golpeado por un cañón de agua, has experimentado el efecto. Recuerda del Capítulo 6 que un gran cambio en la cantidad de movimiento se asocia a un gran impulso. De manera que, cuando el agua proveniente de un cañón de agua te golpea, el impulso puede derribarte. Incluso, las modernas máquinas cortadoras pueden usar un chorro de agua a gran rapidez para cortar acero.

El principio de Bernoulli es una consecuencia de la conservación de la energía, aunque, sorprendentemente, él la desarrolló mucho antes de que se formalizara el concepto de energía.[4] El principio también se deduce de la segunda ley de movimiento de Newton. En cualquier caso, el principio de Bernoulli se aplica a un flujo estacionario suave (llamado flujo *laminar*) de fluido con densidad constante. Sin embargo, a rapideces mayores

[4]En forma matemática: $1/2\ mv^2 + mgy + pV =$ constante (a lo largo de una línea de corriente); donde $m$ es la masa de algún volumen pequeño $V$, $v$ su rapidez, $g$ la aceleración de la gravedad, $y$ su elevación y $p$ su presión interna. Si la masa $m$ se expresa en términos de densidad, $\rho$, donde $\rho = m/V$, y cada término se divide por $V$, la ecuación de Bernoulli se lee: $1/2\rho v^2 + \rho gy + p =$ constante. Entonces los tres términos tienen unidades de presión. Si $y$ no cambia, un aumento de $v$ significa una disminución de $p$, y viceversa. Observa que, cuando $v$ es cero, la ecuación de Bernoulli se reduce a $\Delta p = -\rho g \Delta y$ (densidad de peso × profundidad).

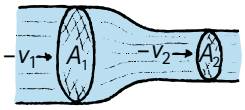
**FIGURA 14.16**
Dado que el flujo es continuo, el agua acelera cuando fluye por la parte estrecha o poco profunda del arroyo.

**pti**

- Dado que el volumen de agua que fluye por una tubería con diferentes áreas transversales $A$ permanece constante, la rapidez de flujo $v$ es alta donde el área es pequeña, y la rapidez es baja donde el área es grande. Esto se indica en la ecuación de continuidad:

$$A_1v_1 = A_2v_2$$

El producto $A_1v_1$ en cualquier punto 1 es igual al producto $A_2v_2$ en el punto 2.




**pti**

- Si alguna vez te has preguntado cómo las brisas ligeras se convierten en vientos briosos en la cima de una montaña, ¡piensa en el principio de continuidad! Aunque ahí no hay tubería que restrinja el flujo de aire, no obstante se restringe y acelera de la misma manera.

Una manguera contra incendios es gorda cuando no vierte agua. Cuando el agua se activa y la manguera chorrea, ¿por qué se vuelve más delgada?

que cierto punto crítico, el flujo puede volverse caótico (llamado flujo *turbulento*) y seguir trayectorias curvas cambiantes, llamadas *remolinos*. Esto ejerce fricción sobre el fluido y disipa parte de su energía. Entonces la ecuación de Bernoulli no se aplica bien.

El cuadro completo de la energía de un fluido en movimiento es bastante complicado. Dicho de manera simple, más rapidez y mayor energía cinética significan menos presión, mientras que más presión significa menos rapidez y menor energía cinética.

## Aplicaciones del principio de Bernoulli

Quienquiera que haya viajado en un convertible con el techo de lona puesto habrá notado que el techo se abomba hacia arriba cuando el automóvil se mueve. ¡Éste es Bernoulli en acción! La presión exterior contra el techo de tela, donde el aire aumenta su rapidez al moverse arriba y sobre el automóvil, es menor que la presión atmosférica estática dentro del automóvil. El resultado es una fuerza neta ascendente sobre la tela.

Piensa en el viento que sopla a través de un techo en punta. Tal como un líquido adquiere rapidez cuando entra en una tubería estrecha, el viento adquiere rapidez pues igualmente se restringe al fluir arriba y sobre el techo. Adquiere rapidez como indica el apiñamiento de las líneas de corriente de la Figura 14.19. La presión a lo largo de las líneas de corriente se reduce donde están más juntas. La mayor presión en el interior del techo puede levantarlo de la casa. Durante una tormenta fuerte, la diferencia entre las presiones exterior e interior no necesita ser muy grande. Una pequeña diferencia de presión a través de un área grande produce una fuerza que puede ser tremenda.

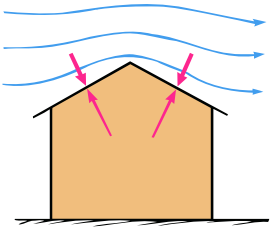


**FIGURA 14.19**
La presión del aire arriba del techo es menor que la presión del aire abajo del techo.

Si piensas en el techo desprendido como en el ala de un avión, podrás entender mejor la fuerza de sustentación que sostiene una pesada aeronave. En ambos casos, una mayor presión por abajo empuja el techo o el ala hacia una región de menor presión arriba. Las alas vienen en una variedad de diseños. Lo que todos ellos tienen en común es que el aire se hace fluir más rápido sobre la superficie superior del ala que bajo su superficie inferior. Esto se logra principalmente mediante una inclinación en el ala, llamado *ángulo de ataque*. Entonces el aire fluye más rápido sobre la superficie superior en gran medida por la misma razón por la que el aire fluye más rápido en una tubería estrecha o en cualquiera otra región constreñida. Con frecuencia, mas no siempre, diferentes rapideces de flujo de aire arriba y abajo de un ala se aumentan mediante una diferencia en la curvatura (*comba*) de las superficies superior e inferior del ala. El resultado son líneas de corriente más apiñadas a lo largo de la superficie superior del ala que a lo largo de la parte inferior. Cuando la diferencia de presión promedio sobre el ala se multiplica por el área superficial del ala, se tiene una fuerza ascendente neta: sustentación.[5] La sustentación es mayor cuando hay una gran área de ala y cuando el avión viaja rápido. Un deslizador tiene un área de ala muy grande en relación con su peso, de modo que no tiene que ir muy rápido para tener suficiente sustentación. En el otro extremo, un avión de combate diseñado para un vuelo de gran rapidez tiene un área de ala pequeña en relación con su peso. En consecuencia, debe despegar y aterrizar a gran rapidez.

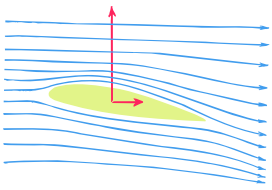


**FIGURA 14.20**
El vector vertical representa la fuerza ascendente neta (sustentación) que resulta de mayor presión de aire bajo el ala que arriba del ala. El vector horizontal representa el arrastre aerodinámico.

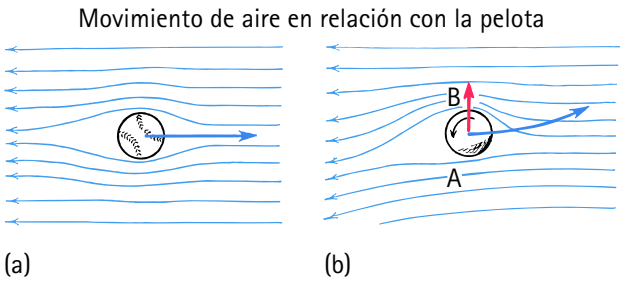



**FIGURA 14.21**
(a) Las líneas de corriente son las mismas en cualquier lado de una pelota de béisbol que no gira. (b) Una pelota que gira produce un apiñamiento de líneas de corriente. La "sustentación" resultante (flecha roja) hace que la bola se curve, como se muestra con la flecha azul.

Todo mundo sabe que un lanzador de béisbol puede impartir un giro a una pelota para hacer que se curve hacia un lado mientras se aproxima al home. De igual modo, un jugador de tenis puede golpear una bola de modo que haga una curva. Una delgada capa de aire se arrastra por fricción alrededor de la bola que gira, que aumenta con las costuras de la pelota de béisbol o con las pelusas de la bola de tenis.[6] La capa de aire en movimiento produce un apiñamiento de líneas de corriente en un lado.

[5]Las diferencias de presión sólo son una forma de entender la sustentación del ala. Otra forma consiste en usar la tercera ley de Newton. El ala fuerza el aire hacia abajo (acción) y el aire fuerza el ala hacia arriba (reacción). El aire se desvía hacia abajo por la inclinación del ala, el ángulo de ataque, ¡incluso cuando vuela de cabeza! Cuando viajes en un automóvil, saca la mano por la ventanilla y pretende que es un ala. Inclínala un poco de modo que el aire se fuerce hacia abajo. ¡Tu mano se eleva! La sustentación del aire brinda un buen ejemplo para recordarte que con frecuencia hay más de una forma de explicar el comportamiento de la naturaleza.

[6]Estrictamente hablando, el principio de Bernoulli se aplica al flujo de un fluido libre de fricción. Si estudias la curvatura de las bolas aún más, busca el efecto Magnus, que tiene que ver con fricción y la viscosidad.

## PRACTICANDO LA FÍSICA

Dobla una tarjeta de archivo y forma un pequeño puente o túnel. Colócala sobre una mesa y sopla por el arco como se muestra. Sin importar cuán fuerte soples, no lograrás tirar la tarjeta de la mesa (a menos que soples contra el lado de la tarjeta). Intenta esto con tus amigos que no han cursado física. ¡Luego explícale a tus amigos!

Observa en la Figura 14.21b que las líneas de corriente están más apiñadas en B que en A para la dirección de giro que se muestra. La presión del aire es mayor en A y la bola hace la curva que se muestra.

Descubrimientos recientes muestran que muchos insectos aumentan su sustentación cuando emplean movimientos similares a los de una pelota de béisbol que hace una curva. Es interesante que la mayoría de los insectos no batan sus alas arriba y abajo. Las baten adelante y atrás, con una inclinación que proporciona un ángulo de ataque. Entre batidos, sus alas hacen movimientos semicirculares para crear sustentación.

Un conocido rociador manual utiliza el principio de Bernoulli (Figura 14.22). Cuando oprimes la pera de goma, el aire se fuerza desde un canal más ancho hacia uno más estrecho y sale con menor presión que la presión atmosférica normal arriba del extremo abierto de un tubo insertado en el flujo de líquido. La presión atmosférica sobre el líquido abajo empuja entonces al líquido hacia arriba por el tubo, donde es transportado por el chorro de aire.

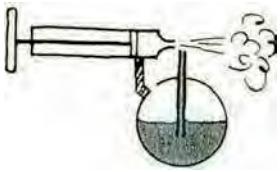


**FIGURA 14.22**
¿Por qué el líquido del depósito sube por el tubo?

El principio de Bernoulli explica por qué los camiones que pasan cerca en la autopista se atraen entre sí, y por qué los barcos que pasan juntos corren el riesgo de una colisión lateral. El agua que fluye entre los barcos viaja más rápido que el agua que fluye por los lados exteriores. Las líneas de corriente están más juntas entre los barcos que afuera, de modo que la presión del agua que actúa contra las quillas se reduce entre los barcos. Incluso una pequeña reducción de presión contra el área superficial relativamente enorme de los lados de los barcos puede producir una fuerza significativa. A menos que los barcos se dirijan para compensar esto, la mayor presión contra los lados exteriores de los barcos los fuerza a juntarse. La Figura 14.23 muestra cómo demostrar esto en el fregadero de tu cocina o en la tina de baño.

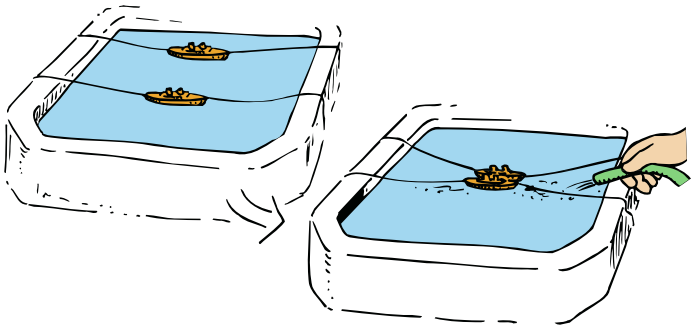


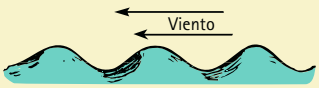
**FIGURA 14.23**
Amarra holgadamente un par de botes de juguete, uno al lado del otro, en tu fregadero. Luego dirige un chorro de agua entre ellos. Los botes se juntarán y chocarán. ¿Por qué?

El principio de Bernoulli tiene algo que ver cuando la cortina de la regadera se balancea hacia ti en el baño cuando el agua sale a su máxima capacidad. La presión en el espacio de la regadera se reduce ligeramente con el fluido en movimiento, y la presión relativamente mayor en el exterior de la cortina la empuja hacia adentro. Al igual que muchas cosas en el complejo mundo real, éste no es más que un solo principio físico aplicado en esta situación. Más importante es la convección del aire en la regadera. En cualquier caso, la siguiente vez que tomes una ducha y la cortina se balancee hacia tus piernas, piensa en Daniel Bernoulli.

**FIGURA 14.24**
La forma curva de una sombrilla puede ser desventajosa en un día ventoso.

### PUNTO DE CONTROL

**Un día ventoso produce olas en un lago o el océano. ¿Cómo ayuda el principio de Bernoulli a crear ondas más altas?**




### COMPRUEBA TU RESPUESTA

Los valles de las olas están parcialmente protegidos del viento, de modo que el aire viaja más rápido sobre las crestas. Por tanto, la presión sobre las crestas es menor que en los valles. La mayor presión en los valles empuja el agua hacia arriba, hacia las crestas.

**SCREENCAST: Aplicaciones de Bernoulli**

## 14.6 Plasma

Además de sólidos, líquidos y gases, hay una cuarta fase de la materia: **plasma** (no la confundas con la parte líquida y transparente de la sangre, también llamada plasma). El plasma es la fase menos común en el entorno cotidiano, pero es la fase de la materia más prevaleciente en el Universo como totalidad. El Sol y otras estrellas son principalmente plasma.

Un plasma es un gas electrificado. Los átomos que lo constituyen están *ionizados*, despojados de uno o más electrones, con un número correspondiente de electrones libres. Recuerda que un átomo neutro tiene tantos protones positivos dentro del núcleo como electrones negativos afuera del núcleo. Cuando uno o más de esos electrones se desprenden del átomo, el átomo tiene más carga positiva que negativa y se convierte en un *ion positivo*. (Bajo algunas condiciones, puede tener electrones adicionales, en cuyo caso es un *ion negativo*.) Aunque electrones e iones tienen carga eléctrica, el plasma como totalidad es eléctricamente neutro porque todavía hay igual número de cargas positivas y negativas, tal como las hay en un gas ordinario. No obstante, un plasma y un gas tienen propiedades muy diferentes. El plasma conduce fácilmente la corriente eléctrica, absorbe ciertos tipos de radiación que pasan libremente a través de un gas, y se le puede dar forma, moldearse y moverse mediante campos eléctricos y magnéticos.

El Sol es una bola de plasma caliente. En los laboratorios de la Tierra se crean plasmas mediante gases calentados a muy altas temperaturas, lo que los hace tan calientes que los electrones "hierven" en los átomos. Los plasmas también pueden crearse a temperaturas más bajas al bombardear átomos con partículas o radiación de alta energía.

**FIGURA 14.25**
En la noche, las calles se iluminan con plasmas que brillan.

### Plasma en el mundo cotidiano

Si lees esto a la luz emitida por una lámpara fluorescente o una bombilla fluorescente compacta, no tienes que buscar mucho para ver el plasma en acción. Dentro del tubo brillante hay plasma que contiene iones de argón y mercurio (así como muchos átomos neutros de dichos elementos). Cuando enciendes la lámpara, un alto voltaje entre electrodos en cada extremo del tubo provoca un flujo de electrones. Estos electrones ionizan algunos átomos y forman plasma, que brinda una ruta de conducción que mantiene el flujo de la corriente. La corriente activa algunos átomos de mercurio y eso los hace emitir radiación, principalmente en la región ultravioleta invisible. Esta radiación hace que el recubrimiento de fósforo en la superficie interior del tubo brille con luz visible.

De igual modo, el gas neón de un anuncio publicitario se convierte en plasma cuando sus átomos se ionizan mediante bombardeo de electrones. Los átomos de neón, después de activarse por la corriente eléctrica, emiten luz predominantemente roja. Los diferentes colores que se ven en dichos anuncios corresponden a plasma compuesto por diferentes tipos de átomos. El argón, por ejemplo, tiene brillo azul, y el helio brilla en rosa. Las lámparas de vapor de sodio utilizadas en la iluminación de las calles emiten luz amarilla estimulada por plasmas que brillan (Figura 14.25).

**FIGURA 14.26**
En una TV de plasma, plasmas brillantes encienden cientos de miles de pequeños píxeles en rojo, verde o azul. Estos colores se combinan en diferentes proporciones para producir todo el espectro de color.

Las pantallas planas de TV de plasma están compuestas por muchos miles de píxeles, cada uno compuesto a su vez de tres celdas de subpíxel separadas. Una celda tiene un fósforo que brilla en rojo, otra tiene un fósforo que brilla en verde y la otra azul. Los píxeles están en medio de una red de electrodos que se cargan miles de veces en una pequeña fracción de segundo, lo que produce corrientes eléctricas que fluyen a través de gases en las celdas. Como en una lámpara fluorescente, los gases se convierten en plasmas brillantes que liberan luz ultravioleta que estimula los fósforos. La imagen sobre la pantalla es la mezcla de colores de píxel activados por la señal de control del TV.

La aurora boreal y la aurora austral (llamadas luces del norte y luces del sur, respectivamente) son plasmas brillantes en la atmósfera superior. Capas de plasma de baja temperatura envuelven toda la Tierra. En ocasiones, lluvias de electrones provenientes del espacio exterior y los cinturones de radiación entran a las "ventanas magnéticas" cerca de los polos de la Tierra, chocan con las capas de plasma y producen luz.

## Electricidad plasmática

Un plasma de mayor temperatura es el escape de un motor jet, un plasma débilmente ionizado. Pero cuando se agregan pequeñas cantidades de sales de potasio o metal cesio, se convierte en un muy buen conductor y, cuando se dirigen hacia un imán, ¡pueden generar electricidad! Ésta es energía MHD, la interacción **m**agneto**h**idro**d**inámica entre un plasma y un campo magnético. (En el Capítulo 25 se abordará la mecánica de la generación de electricidad de esta forma.) La energía MHD de baja contaminación ya se usa en algunos lugares del mundo. Espera un poco, quizás verás más energía de plasma con MHD.

Un logro incluso más prometedor será la energía de plasma de un tipo diferente: la fusión controlada de núcleos atómicos. En el Capítulo 34 se abordará el tema de la física de la fusión. Los beneficios de la fusión controlada pueden ser trascendentales. La energía de fusión puede no sólo hacer abundante la energía eléctrica, sino también proporcionar la energía y los medios para reciclar e incluso sintetizar elementos.

La humanidad ha avanzado mucho con el dominio de las tres primeras fases de la materia. El dominio de la cuarta fase puede llevarla mucho más lejos.

**pti**

- Las ondas de radio y TV de alta frecuencia pasan a través de la atmósfera y hacia el espacio. En consecuencia, tienes que estar en la "línea de mira" de las antenas de transmisión o relevo para recoger las señales de FM y TV. Pero las capas de plasma a unos 80 km de altura, que constituyen la ionosfera, reflejan las ondas de radio de baja frecuencia. Eso explica por qué puedes escuchar estaciones de radio de larga distancia en tu radio AM de frecuencia más baja. En la noche, cuando las capas de plasma se juntan más y son más reflejantes, en ocasiones puedes recibir estaciones muy distantes en tu radio AM.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Presión atmosférica.** Presión que se ejerce contra los cuerpos inmersos en la atmósfera. Resulta del peso del aire que oprime hacia abajo desde arriba. A nivel del mar, la presión atmosférica es de aproximadamente 101 kPa.

**Barómetro.** Dispositivo que mide la presión atmosférica.

**Ley de Boyle.** El producto de la presión y el volumen es una constante para una masa dada de gas confinado, en tanto la temperatura permanezca invariable:

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

**Principio de Arquímedes (para aire).** Un objeto en el aire es sostenido con una fuerza igual al peso del aire desplazado.

**Principio de Bernoulli.** Donde la rapidez de un fluido aumenta, la presión interna del fluido disminuye.

**Plasma.** Gas electrificado que contiene iones y electrones libres. La mayor parte de la materia en el Universo está en la fase de plasma.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 14.1 La atmósfera

1. ¿Cuál es la fuente de energía para el movimiento del gas en la atmósfera? ¿Qué evita que los gases atmosféricos vuelen hacia el espacio?
2. ¿Qué tan alto tendrías que ir en la atmósfera para que la mitad de la masa del aire esté abajo de ti?

### 14.2 Presión atmosférica

3. ¿Cuál es la causa de la presión atmosférica?
4. ¿Cuál es la masa de un metro cúbico de aire a temperatura ambiente (20°C)?
5. ¿Cuál es la masa aproximada de una columna de aire de 1 $cm^2$ de área que se extiende desde el nivel del mar hasta la atmósfera superior? ¿Cuál es el peso de esta cantidad de aire?
6. ¿Cuál es la presión en el fondo de la columna de aire a la que se refiere la pregunta anterior?
7. ¿Cómo se compara la presión en el fondo de una columna de mercurio de 76 cm en un barómetro, con la presión del aire en el fondo de la atmósfera?
8. ¿Cómo se compara el peso del mercurio en un barómetro, con el peso de una sección transversal igual de aire, desde el nivel del mar hasta lo alto de la atmósfera?
9. ¿Por qué un barómetro de agua tendría que ser 13.6 veces más alto que un barómetro de mercurio?
10. Cuando bebes líquido por una pajilla, ¿es más exacto decir que el líquido es empujado hacia arriba por la pajilla que succionado por la pajilla? ¿Exactamente cómo se realiza el empuje? Defiende tu respuesta.
11. ¿Por qué una bomba de vacío no funcionará para un pozo que tenga más de 10.3 m de profundidad?
12. ¿Por qué un barómetro aneroide puede medir altitud, así como presión atmosférica?

### 14.3 Ley de Boyle

13. ¿En cuánto aumenta la densidad del aire cuando se comprime a la mitad de su volumen?
14. ¿Qué ocurre con la presión del aire dentro de un globo cuando se apachurra a la mitad de su volumen a temperatura constante?
15. ¿Qué es un gas ideal?

### 14.4 Flotabilidad del aire

16. Un globo que pesa 1 N está suspendido en aire, y no viaja ni hacia arriba ni hacia abajo. (a) ¿Cuánta fuerza de flotación actúa sobre él? (b) ¿Qué ocurre si la fuerza de flotación disminuye? (c) ¿Si aumenta?
17. ¿El aire ejerce fuerza de flotación sobre todos los objetos en el aire o sólo sobre los objetos como los globos que son muy ligeros para su tamaño?
18. ¿Por qué los globos de investigación para grandes alturas sólo están inflados parcialmente cuando se lanzan?

### 14.5 Principio de Bernoulli

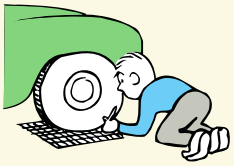
19. ¿Qué son las líneas de corriente?
20. ¿La presión es mayor o menor en las regiones donde las líneas de corriente están más juntas?
21. ¿Qué ocurre con la presión interna de un fluido que fluye en una tubería horizontal cuando su rapidez aumenta?
22. ¿Qué ocurre con la presión interna de un fluido que fluye en una tubería horizontal cuando su rapidez disminuye?
23. ¿El principio de Bernoulli se refiere a cambios en la presión interna de un fluido o a presiones que el fluido puede ejercer sobre los objetos?
24. ¿Cómo es que el aire que se mueve rápidamente sobre el ala de un avión afecta la presión sobre el ala?
25. ¿Cómo es que el agua que se mueve rápidamente entre dos barcos afecta la presión del agua contra los lados de los barcos?
26. ¿Los barcos de la pregunta anterior son succionados o empujados uno hacia el otro? Explica.
27. ¿El fluido que sube por el interior del tubo en un rociador de mano es empujado hacia arriba del tubo o succionado hacia arriba del tubo? Explica.

### 14.6 Plasma

28. ¿Cómo difiere un plasma de un gas?
29. Cita al menos tres ejemplos de plasma en tu entorno diario.
30. ¿Qué puede producirse cuando un haz de plasma se dirige hacia el campo de un fuerte imán?

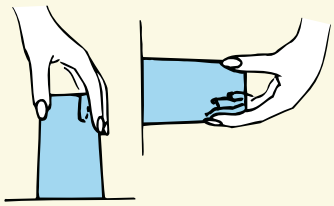
## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

31. Compara la presión ejercida por los neumáticos de tu automóvil sobre el camino, con la presión del aire en los neumáticos. Para este proyecto, necesitas conocer el peso de tu automóvil, que puedes conseguir en un manual o con un vendedor de autos. Divide el peso entre 4 para obtener el peso aproximado que sostiene un neumático. Puedes aproximar bastante el área de contacto de un neumático con el camino si trazas los bordes de contacto del neumático sobre una hoja de papel marcada con cuadrados de 1 pulgada abajo del neumático. Después de calcular la presión del neumático contra el camino, compárala con la presión del aire en el neumático. ¿Son casi iguales? Si no es así, ¿cuál es mayor?



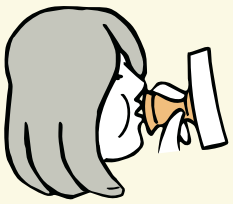
32. En general, para verter agua de un vaso lleno a un vaso vacío simplemente se coloca el vaso lleno arriba del vaso vacío y se inclina. ¿Alguna vez has vertido aire de un vaso a otro? El procedimiento es similar. Sumerge dos vasos en agua, con las bocas hacia abajo. Deja que uno se llene con agua al inclinar su boca hacia arriba. Luego sostén boca abajo la boca del vaso lleno de agua arriba del vaso lleno de aire. Inclina lentamente el vaso inferior y deja que el aire escape y llene el vaso superior. ¡Verterás aire de un vaso a otro!

33. Eleva sobre el nivel del agua un vaso sumergido boca abajo lleno del líquido, pero con su boca bajo la superficie. ¿Por qué no escapa el agua? ¿Cuán alto tendría que ser un vaso antes de que el agua comience a salir? (No podrás hacer esto en el interior a menos que tengas un techo que esté al menos 10.3 m más arriba del nivel del agua.)
34. Coloca una tarjeta sobre la parte superior de un vaso lleno hasta el borde con agua y voltéalo. ¿Por qué la tarjeta permanece en su lugar? Inténtalo hacia los lados.

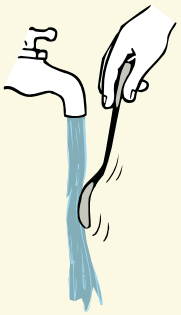


35. Invierte una botella de gaseosa o un frasco con cuello delgado llenos de agua. Observa que el agua no simplemente cae, sino que borbotea del recipiente. La presión del aire no lo dejará escapar sino hasta que algo de aire entre en la botella para ocupar el espacio de arriba del líquido. ¿Cómo se vaciaría en la Luna una botella invertida llena de agua?
36. Calienta una pequeña cantidad de agua para que hierva en una lata de aluminio de gaseosa e inviértela rápidamente en un plato de agua más fría. ¡Sorprendentemente espectacular!
37. Inserta en agua un tubo de vidrio estrecho o pajilla y coloca tu dedo sobre la parte superior del tubo. Levanta el tubo del agua y luego retira el dedo de lo alto del tubo. ¿Qué ocurre? (Harás esto con frecuencia si te inscribes en un laboratorio de química.)

38. Con un alfiler, perfora una tarjeta pequeña y colócala en el orificio de un carrete de hilo. Intenta separar la tarjeta del carrete al soplar por el orificio, como Evan Jones hace en una de las fotografías al inicio del capítulo. Inténtalo en todas direcciones.



39. Sostén una cuchara en un chorro de agua, como se muestra, y siente el efecto de la diferencia de presiones.



## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

40. Estima la fuerza de flotación que ejerce el aire sobre ti. (Para hacer esto, puedes estimar tu volumen si conoces tu peso y supones que tu densidad de peso es un poco menor que la del agua.)
41. Un amigo escalador, con una masa de 80 kg, considera la idea de amarrarse un globo lleno de helio para reducir de una manera efectiva su peso en 25% cuando escale. Se pregunta de qué tamaño aproximado sería tal globo. Al escuchar de tus habilidades en física, te pregunta. Comparte con él tus cálculos que muestren que el volumen del globo debe ser de aproximadamente 17 $m^3$ (un poco más de 3 m de diámetro para un globo esférico).
42. En un perfecto día de otoño, flotas a baja altitud en un globo aerostático, que no acelera ni arriba ni abajo. El peso total del globo, incluida su carga y el aire caliente en él, es 20,000 N.
    a. Demuestra que el peso del aire desplazado es 20,000 N.
    b. Demuestra que el volumen del aire desplazado es 1,700 $m^3$.
43. Considera un avión con una superficie de ala total de 100 metros cuadrados. A cierta rapidez, la diferencia en la presión del aire abajo y arriba de las alas es de 4% la presión atmosférica. Demuestra que la sustentación sobre el avión es 400,000 N.
44. El peso de la atmósfera sobre 1 metro cuadrado de superficie de la Tierra es de alrededor de 100,000 N. Desde luego, la densidad disminuye con la altitud. Pero supón que la densidad del aire fuera constante en 1.2 $kg/m^3$. Calcula dónde estaría la parte superior de la atmósfera.

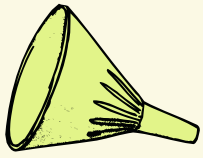
## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

45. Clasifica los volúmenes de aire en el vaso, de mayor a menor, cuando se sostiene
    a. cerca de la superficie como se muestra.
    b. 1 m bajo la superficie.
    c. 2 m bajo la superficie.

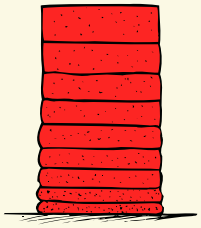
46. Clasifica las fuerzas de flotación que proporciona la atmósfera sobre los siguientes, de mayor a menor:
    a. un elefante.
    b. un globo de fiesta lleno de helio.
    c. un paracaidista a velocidad terminal.
47. Clasifica de mayor a menor las cantidades de sustentación sobre las siguientes alas de avión:
    a. 1,000 $m^2$ de área, con diferencia de presión atmosférica de 2.0 $N/m^2$.
    b. 800 $m^2$ de área, con diferencia de presión atmosférica de 2.4 $N/m^2$.
    c. 600 $m^2$ de área, con diferencia de presión atmosférica de 3.8 $N/m^2$.

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

48. Se dice que un gas ocupa todo el espacio disponible para él. ¿Por qué, entonces, la atmósfera no sale hacia el espacio?
49. ¿Por qué no hay atmósfera en la Luna?
50. ¿Por qué la presión en los neumáticos de un automóvil es ligeramente mayor después de que el automóvil se ha conducido durante varios kilómetros?
51. El vástago de la válvula de un neumático debe ejercer cierta fuerza sobre el aire interior para evitar que escape el aire. Si el diámetro del vástago de la válvula se duplica, ¿en cuánto aumentaría la fuerza ejercida por el vástago de la válvula?
52. ¿Por qué un balón blando de fútbol parcialmente inflado a nivel del mar es mucho más firme cuando se lleva a una mayor altura en las montañas?
53. ¿Cuál es el propósito de las crestas que evitan que el embudo se ajuste firmemente en la boca de una botella?



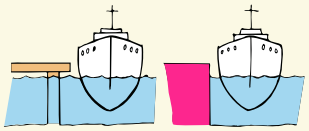
54. ¿Cómo se compara la densidad del aire en una mina profunda, con la densidad del aire en la superficie de la Tierra?
55. Cuando una burbuja de aire se eleva en el agua, ¿qué ocurre con su masa, su volumen y su densidad?
56. ¿Por qué supones que las ventanas de los aviones son más pequeñas que las ventanas de los autobuses?
57. Es posible entender cómo la presión en el agua depende de la profundidad si piensas en una pila de ladrillos. La presión bajo el ladrillo inferior está determinada por el peso de toda la pila. A la mitad de la pila, la presión es la mitad, porque el peso de los ladrillos que están encima es la mitad. Para explicar la presión atmosférica, debes considerar ladrillos comprimibles, como los hechos con espuma de caucho. ¿Por qué esto es así?



58. La "bomba" en una aspiradora es simplemente un ventilador de gran rapidez. ¿Una aspiradora recogería polvo de una alfombra en la Luna? Explica.
59. Supón que la bomba que se muestra en la Figura 14.9 opera con un vacío perfecto. ¿A partir de qué profundidad podría bombear agua de un pozo?
60. Si un líquido sólo la mitad de denso que el mercurio se usara en un barómetro, ¿cuán alto sería su nivel en un día de presión atmosférica normal?
61. ¿Por qué el tamaño del área transversal de un barómetro de mercurio no afecta la altura de la columna de mercurio encerrada?
62. ¿Desde qué profundidad podría extraerse mercurio de un recipiente con un sifón?
63. Si de algún modo pudieras sustituir con un líquido más denso el mercurio de un barómetro de mercurio, ¿la altura de la columna de líquido sería mayor o menor que la altura del mercurio? ¿Por qué?
64. ¿Sería un poco más difícil extraer gaseosa por una pajilla a nivel del mar o en la cima de una montaña muy alta? Explica.
65. ¿Por qué es tan difícil respirar con un *snorkel* a una profundidad de 1 m y prácticamente imposible a una profundidad de 2 m? ¿Por qué un buzo simplemente no puede respirar por una manguera que se extienda hasta la superficie?
66. Una niña pequeña sentada en un automóvil en un semáforo sostiene un globo lleno de helio. Las ventanas están cerradas y el automóvil es relativamente hermético. Cuando la luz se pone verde y el automóvil acelera hacia adelante, su cabeza va hacia atrás pero el globo hacia adelante. Explica por qué.

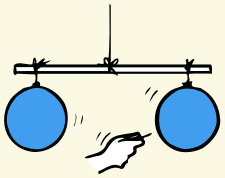
67. ¿Cómo es que el concepto de flotabilidad complica la vieja pregunta: "qué pesa más: una libra de plomo o una libra de plumas"?
68. ¿Por qué una báscula de precisión proporciona lecturas diferentes para el peso de un objeto en aire y en un vacío (recuerda que el peso es la fuerza ejercida contra una superficie de soporte)? Cita un ejemplo en el que esto sería una consideración importante.
69. ¿Una botella de gas helio pesaría más o menos que una botella idéntica llena de aire a la misma presión? ¿Que una botella idéntica con el aire extraído?
70. Cuando sustituyes helio en un globo con hidrógeno menos denso, ¿la fuerza de flotación sobre el globo cambia si el globo permanece del mismo tamaño? Explica.
71. Un tanque de acero lleno de gas helio no se eleva en el aire, pero un globo que contiene el mismo helio se eleva con facilidad. ¿Por qué?
72. Si el número de átomos de gas en un recipiente se duplica, la presión del gas se duplica (si supones temperatura y volumen constantes). Explica este aumento de presión en términos del movimiento molecular del gas.
73. ¿Qué cambio de presión ocurre en un globo que se oprime a un tercio de su volumen sin cambio de temperatura?
74. ¿Qué, si algo, ocurre con el volumen del gas en un globo de investigación atmosférica cuando se calienta?
75. ¿Qué sucede con la presión del gas en un globo de caucho cuando el globo se oprime para hacerlo más pequeño?
76. ¿Qué ocurre con el tamaño de las burbujas de aire liberadas por un buzo mientras ascienden?
77. Tú y tu amistoso vendedor de automóviles ponen a flotar una larga cadena de globos llenos de helio muy cercanos entre sí sobre su lote de autos usados. Sujetas los dos extremos de la larga cadena de globos a diferentes puntos sobre el suelo, de modo que los globos flotan sobre el lote en un arco. ¿Cuál es el nombre de este arco? (¿Por qué este ejercicio podría incluirse en el Capítulo 12?)
78. La presión del gas dentro de un globo de caucho inflado siempre es mayor que la presión del aire exterior. Explica.
79. La fuerza de la atmósfera a nivel del mar contra el exterior de una ventana de 10 $m^2$ de un almacén es de aproximadamente un millón N. ¿Por qué esto no rompe la ventana? ¿Por qué la ventana puede romperse con un fuerte viento que sople en la ventana?
80. ¿Por qué el fuego de un hogar arde más vigorosamente en un día ventoso?
81. ¿Qué ocurre con la presión del agua conforme acelera cuando sale por la boquilla de una manguera de jardín?
82. ¿Por qué los aviones por lo general despegan de frente al viento?
83. ¿Qué proporciona la sustentación para mantener un *frisbee* en vuelo?
84. Cuando un gas que fluye estacionariamente fluye de una tubería con mayor diámetro a una tubería con menor diámetro, ¿qué ocurre con (a) su rapidez, (b) su presión y (c) el espaciamiento entre sus líneas de corriente?
85. Compara el espaciamiento de las líneas de corriente alrededor de una pelota de béisbol lanzada que no gira en vuelo, con el espaciamiento de las líneas de corriente alrededor de una que sí lo hace. ¿Por qué la pelota de béisbol que gira se desvía del curso de una que no gira?

86. ¿Por qué es más fácil lanzar una curva con una bola de tenis que con una pelota de béisbol?
87. ¿Por qué los aviones extienden alerones que aumentan el área y el ángulo de ataque del ala durante los despegues y los aterrizajes? ¿Por qué dichos alerones se retraen cuando el avión llega a rapidez de crucero?
88. ¿Cómo es que un avión puede volar boca abajo?
89. ¿Por qué las pistas de despegue son más largas para los despegues y aterrizajes en los aeropuertos a gran altitud, como Denver y la Ciudad de México?
90. ¿Cómo se moverán dos hojas de papel que cuelgan verticalmente cuando soples entre ellas? Inténtalo y observa.
91. ¿Qué principio físico subyace a estas tres observaciones? Cuando pasa un camión que se aproxima por la autopista, tu automóvil tiende a bambolearse hacia el camión. El techo de lona de un automóvil convertible se abomba hacia arriba cuando el automóvil viaja a grandes rapideces. Las ventanas de los trenes antiguos en ocasiones se rompen cuando un tren de gran rapidez pasa junto a ellos en la vía vecina.
92. Los embarcaderos están hechos con pilotes que permiten el libre paso del agua. ¿Por qué un embarcadero con una pared sólida sería desventajoso para las embarcaciones que intenten atracar a su lado?



## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

93. Si cuentas los neumáticos de un gran camión con remolque que descarga alimentos en tu supermercado local, puede que te sorprenda contar 18 neumáticos. ¿Por qué tantos neumáticos? (*Sugerencia*: considera el Piensa y realiza número 31.)
94. Dos equipos de ocho caballos cada uno no pudieron separar los hemisferios de Magdeburgo (que se muestran en la página de inicio de este capítulo). Supón que dos equipos de nueve caballos cada uno pudieran separarlos. Entonces, ¿un equipo de nueve caballos lo lograría si el otro equipo se sustituyera con un fuerte árbol? Discute esto y defiende tu respuesta.
95. Cuando abordas un avión, llevas una bolsa de papas fritas (o cualquier otro objeto empacado en una bolsa hermética) y, mientras estás en vuelo, observas que la bolsa revienta. Discute por qué ocurre esto.
96. La presión ejercida contra el suelo por el peso de un elefante, distribuida equitativamente sobre sus cuatro patas, es menor que 1 atmósfera. Discute: ¿por qué serías aplastado bajo la pata de un elefante, mientras que no resultas dañado por la presión de la atmósfera?
97. Tu amigo dice que la fuerza de flotación de la atmósfera sobre un elefante es significativamente mayor que la fuerza de flotación de la atmósfera sobre un pequeño globo lleno de helio. Discute tu respuesta.
98. Discute cuál registrará mayor peso: un globo aplanado vacío o el mismo globo lleno de aire. Defiende tu respuesta; luego inténtalo y observa.
99. En una báscula sensible, pesa una delgada bolsa plástica plana y vacía. Luego pesa la bolsa llena de aire. Discute si las lecturas diferirán o no diferirán.
100. Dos globos idénticos del mismo volumen se bombean con aire a más de la presión atmosférica y se suspenden en los extremos de una vara que se equilibra horizontalmente. Entonces se pincha uno de los globos. Discute si el equilibrio de la vara se altera o no. Si es así, ¿en qué sentido se inclina?



101. Dos globos que tienen el mismo peso y volumen se llenan con iguales cantidades de helio. Uno es rígido y el otro es libre de expandirse conforme la presión exterior disminuye. Cuando se liberan, discute cuál se elevará más alto.
102. Un globo lleno de helio y un balón de básquetbol tienen el mismo volumen. ¿Sobre cuál es mayor la fuerza de flotación del aire circundante? Discute por qué el globo está en el techo de una habitación mientras que el balón está en el suelo.
103. Imagina una enorme colonia espacial que consista en un cilindro giratorio lleno de aire. Discute cómo se compararía la densidad del aire "a nivel del suelo" con las densidades del aire "arriba".
104. Discute si un globo lleno de helio podría "elevarse" en la atmósfera de un hábitat espacial giratorio.
105. Discute si la presión más baja es resultado o no de aire que se mueve rápidamente, o el aire que se mueve rápidamente es resultado de una presión más baja. Ofrece un ejemplo que sustente cada punto de vista. (En física, cuando dos cosas se relacionan, como fuerza y aceleración o rapidez y presión, por lo general es arbitrario a cuál se le llama *causa* y a cuál se le llama *efecto*.)

# PARTE DOS Examen de práctica de opción múltiple

*Elige la MEJOR respuesta a cada una de las siguientes preguntas:*

1. Si dos protones y dos neutrones se retiran de un núcleo de neón-20, ¿un núcleo de cuál elemento permanece?
   (a) Magnesio-12.
   (b) Magnesio-20.
   (c) Oxígeno-18.
   (d) Oxígeno-16.
2. El núcleo de un átomo de hierro eléctricamente neutro contiene 26 protones. El número de electrones que tiene este átomo de hierro es
   (a) 52.
   (b) 26.
   (c) 24.
   (d) Ninguno.
3. ¿Cuántos electrones hay en la tercera capa del sodio, Na (número atómico 11)?
   (a) Ninguno.
   (b) Uno.
   (c) Dos.
   (d) Tres.
4. Los cristales que constituyen los minerales están compuestos de
   (a) átomos con un arreglo geométrico definido.
   (b) moléculas que se mueven de manera perpetua.
   (c) patrones de rayos X.
   (d) tableros de ajedrez tridimensionales.
5. Si el volumen de un objeto se duplica, sin cambio en su masa, su densidad
   (a) se reduciría a la mitad.
   (b) se duplicaría.
   (c) sería la misma.
   (d) Ninguna de las anteriores.
6. De acuerdo con la ley de Hooke, si cuelgas de la rama de un árbol y observas cuánto se dobla, entonces al colgar el doble de peso se produce
   (a) la mitad del doblado.
   (b) el mismo doblado si la rama no se rompe.
   (c) el doble de doblado.
   (d) 4 veces el doblado.
7. Cuando doblas la rama de un árbol al colgarte por su extremo, el lado superior de la rama está bajo
   (a) tensión.
   (b) compresión.
   (c) Ambas.
   (d) Ninguna.
8. Cuando escalas un objeto hasta 3 veces su tamaño lineal, el área superficial aumenta por
   (a) 3 y el volumen por 9.
   (b) 3 y el volumen por 27.
   (c) 9 y el volumen por 27.
   (d) 4 y el volumen por 8.
9. La piedra pómez es una roca volcánica que flota en el agua. La densidad de la piedra pómez, comparada con la del agua, es
   (a) menor.
   (b) igual.
   (c) mayor.
   (d) ninguna, pues se hunde.
10. La presión en el fondo de un estanque NO depende de
    (a) la aceleración debida a la gravedad.
    (b) la densidad del agua.
    (c) la profundidad del estanque.
    (d) el área superficial del estanque.
11. Un objeto completamente sumergido siempre desplaza su propio(a)
    (a) peso de fluido.
    (b) volumen de fluido.
    (c) densidad de fluido.
    (d) Todo lo anterior.
12. Una roca suspendida de una báscula pesa 5 N fuera del agua y 3 N cuando se sumerge en agua. ¿Cuál es la fuerza de flotación sobre la roca?
    (a) 3 N
    (b) 5 N
    (c) 8 N
    (d) Ninguna de las anteriores.
13. En un vacío, un objeto no tiene
    (a) fuerza de flotación.
    (b) masa.
    (c) peso.
    (d) Todas las anteriores.
14. La presión atmosférica se debe a
    (a) el peso de la atmósfera.
    (b) el peso y el volumen de la atmósfera.
    (c) la densidad de peso y el volumen de la atmósfera.
    (d) el peso del planeta Tierra.
15. Considera dos barómetros de mercurio, uno que tiene un área transversal de 1 $cm^2$ y el otro 2 $cm^2$. La altura de mercurio en el tubo más estrecho es
    (a) la mitad.
    (b) el doble.
    (c) la misma.
    (d) Ninguna de las anteriores.
16. Un barómetro que usa agua en lugar de mercurio será
    (a) más corto.
    (b) más alto.
    (c) de la misma altura.
    (d) inoperable.
17. Cuando oprimes un globo lleno de aire aumentas su
    (a) volumen.
    (b) masa.
    (c) peso.
    (d) densidad.
18. En la operación de una prensa hidráulica, el pistón de salida no puede
    (a) moverse más lejos que el pistón de entrada.
    (b) superar la fuerza de entrada.
    (c) superar la rapidez del pistón de entrada.
    (d) producir un aumento de energía.
19. El vuelo de un dirigible ilustra mejor
    (a) el principio de Arquímedes.
    (b) el principio de Pascal.
    (c) el principio de Bernoulli.
    (d) la ley de Boyle.
20. Cuando el viento acelera mientras sopla sobre lo alto de una colina, la presión atmosférica ahí
    (a) aumenta.
    (b) disminuye.
    (c) no es afectada.
    (d) se reduce a cero.

*Después* de hacer elecciones razonadas, y discutirlas con tus amigos, encuentra las respuestas en la página S-1.

PARTE TRES

# Calor

Aunque la temperatura de estas chispas supera los 2,000°C, el calor que imparten cuando golpean mi piel es muy pequeño, lo cual ilustra que la *temperatura* y el *calor* son conceptos diferentes. Aprender a distinguir entre conceptos muy relacionados es el desafío y la esencia de la *Física conceptual*.

15

CAPÍTULO 15

# Temperatura, calor y expansión

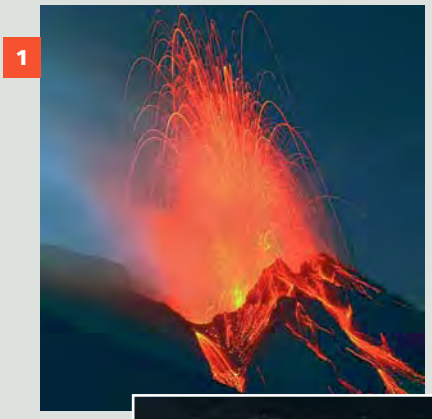

15.1 Temperatura

15.2 Calor

15.3 Capacidad calorífica específica

15.4 La alta capacidad calorífica específica del agua

15.5 Expansión térmica

1 Los materiales calientes, como la lava y las cenizas que brotan de un volcán, están compuestos de átomos y moléculas que se mueven rápidamente. 2 Los Hewitt junto a lava de movimiento lento en Hawái. 3 Anette Zetterberg pide a sus alumnos predecir si la bola podrá o no pasar por el orificio cuando el anillo se calienta. 4 Un testimonio a Daniel Gabriel Fahrenheit se muestra afuera de su casa (ahora en Gdansk, Polonia). 5 La estructura hexagonal de un copo de nieve es resultado de los cristales de hielo hexagonales que lo constituyen.

Recuerdo que, cuando niño, siempre que mi familia pasaba por el Massachusetts Institute of Technology, en Cambridge, a algunas millas de mi hogar en Saugus, el nombre RUMFORD inscrito en lo alto de uno de los edificios destacados apuntaba hacia mí. Me habían dicho que nuestra familia descendía de este gran científico y diplomático.

Rumford, quien originalmente se llamaba Benjamin Thompson, nació en Woburn, Massachusetts, en 1753. A la edad de 13 años demostró una habilidad inusual con los dispositivos mecánicos y tenía un dominio casi impecable del idioma y la gramática. Pronto asistió a clases de ciencia en la Harvard University. A los 19 años de edad se convirtió en profesor en Concord (antes llamada Rumford), New Hampshire. Ahí conoció y se casó con una viuda rica 14 años mayor. Luego, durante el estallido de la guerra de independencia de Estados Unidos, se puso de parte de los leales a Inglaterra y durante algún tiempo espió para ellos. Al enfrentar su arresto en 1776 abandonó a su esposa e hija y huyó delante de una turba armada con brea caliente y bolsas de plumas. Se dirigió a Boston durante la evacuación de las tropas británicas y abordó un barco hacia Inglaterra. Una vez ahí, su carrera científica prosperó. Sus experimentos con pólvora tuvieron tanto éxito que a los 26 años de edad fue elegido en la prestigiosa Royal Society. Con el tiempo se dirigió a Bavaria, donde fue nombrado conde por el príncipe bávaro a quien le fabricaba cañones. Escogió el nombre de conde de Rumford en honor a Rumford, New Hampshire.

Para fabricar un cañón, primero se moldea un gran cilindro metálico en una fundición. Luego el cilindro se coloca en un torno, donde se perfora el barril al hacer avanzar un taladro estacionario por el molde. El torno de Rumford era impulsado por caballos, como se acostumbraba en esa época. Rumford quedaba perplejo ante las enormes cantidades de calor producidas en el proceso. La noción de calor en la época, un fluido hipotético llamado calórico, no encajaba con la evidencia. Con un taladro romo, la cantidad de calor era mayor. En tanto los caballos continuaran con su trabajo, se producía cada vez más calor. La fuente de calor no era algo en el metal, sino el movimiento de los caballos. Este descubrimiento ocurrió mucho antes de que la fricción se considerara como una fuerza y antes de que se entendieran los conceptos de energía y de su conservación. Las mediciones cuidadosas de Rumford lo convencieron de la falsedad de la teoría del calórico del calor. No obstante, la teoría del calórico del calor como un fluido se sostuvo durante muchos años. Con el tiempo, los experimentos de Rumford se repitieron y condujeron a la conexión entre calor y trabajo.

Los logros de Rumford no se limitaron a la ciencia. Por ejemplo, mientras estuvo en Munich, puso a trabajar a mendigos desempleados en la fabricación de uniformes para el ejército. También los puso a trabajar en proyectos públicos, uno de los cuales ahora son los famosos Jardines Ingleses. Una estatua de bronce del conde de Rumford se levanta ahí como testimonio de la gratitud de los ciudadanos de Munich.

Los muchos inventos de Rumford lo convirtieron en un hombre rico. En 1796 entregó a la Royal Society de Gran Bretaña y a la American Academy of Arts and Sciences 5,000 dólares a cada una para patrocinar preseas que se otorgarían cada dos años para la investigación científica destacada en calor o luz. Con los años, una serie de renombrados científicos de Europa y Estados Unidos han recibido las preseas, incluidos Michael Faraday, James Maxwell, Louis Pasteur y Thomas Edison. El resto de los bienes de Rumford se entregaron a la Harvard University, donde se usaron para establecer la actual Cátedra Rumford.

Rumford fue honrado en todo el mundo. En 1805 cortejó y se casó con madame Lavoisier, viuda de Antoine Lavoisier. Sin embargo, el matrimonio fue breve y pronto se separaron. Rumford se estableció en París y continuó con su trabajo científico, ampliando la larga lista de sus muchos inventos, hasta su muerte en 1814.

¡Vaya un pariente increíble!

## 15.1 Temperatura

Toda la materia (sólida, líquida y gaseosa) está compuesta de átomos o moléculas en continuo movimiento. Debido a este movimiento azaroso, los átomos y las moléculas de la materia tienen energía cinética. La energía cinética promedio de cada partícula produce un efecto que puedes sentir: calidez. La cantidad que indica la calidez con respecto a algún estándar se llama **temperatura**. El primer "medidor térmico" para medir temperatura, el *termómetro*, lo inventó Galileo en 1602 (la palabra *térmico* viene del término griego que se utiliza para "calor"). El alguna vez familiar termómetro de mercurio en vidrio alcanzó amplia difusión unos 70 años después. (Ahora los termómetros de mercurio son obsoletos debido al peligro de envenenamiento con mercurio.) La

**VIDEO: Temperaturas bajas con nitrógeno líquido**

**FIGURA 15.1**
¿Puedes confiar en tu sensación de caliente y frío? ¿Ambos dedos sienten la misma temperatura cuando los colocas en el agua tibia?

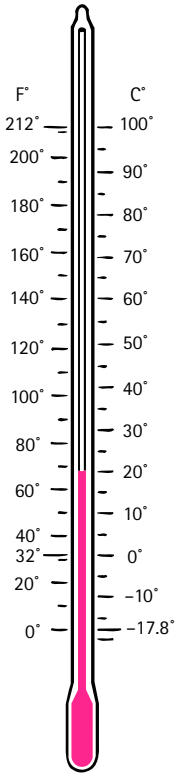



**FIGURA 15.2**
Escalas Fahrenheit y Celsius en un termómetro.

temperatura de alguna cantidad de materia se expresa con un número que corresponde a su grado de calidez o frialdad en alguna escala elegida.

Casi todos los materiales se expanden cuando su temperatura se eleva y se contraen cuando su temperatura disminuye. La mayor parte de los termómetros miden la temperatura mediante la expansión o contracción de un líquido, por lo general mercurio o alcohol coloreado, en un tubo de vidrio con escala.

En la escala de temperatura de uso más generalizado, la escala internacional, el número 0 se asigna a la temperatura a la que el agua se congela y el número 100 a la temperatura a la que el agua hierve (a presión atmosférica a nivel del mar). El espacio intermedio se divide en 100 partes iguales denominadas *grados*; por tanto, un termómetro calibrado de esta forma se llama *termómetro centígrado* (de *centi*, "centésima", y *gradus*, "paso"). Sin embargo, ahora se le llama *termómetro Celsius* en honor al hombre que sugirió la escala por primera vez, el astrónomo sueco Anders Celsius (1701-1744).

Hay otra escala de temperatura popular en Estados Unidos. En esta escala, el número 32 se asigna a la temperatura a la que se congela el agua, y el número 212 se asigna a la temperatura a la que hierve el agua. Tal escala constituye un termómetro Fahrenheit, en honor a su ilustre inventor, el físico alemán Daniel Gabriel Fahrenheit (1686-1736). La escala Fahrenheit se volverá obsoleta si algún día Estados Unidos adopta el sistema métrico.[1]

La escala de temperatura preferida por los científicos es la escala Kelvin, llamada así en honor al físico escocés William Thomson, primer barón Kelvin (1824-1907). Esta escala está calibrada no en términos de los puntos de congelación y ebullición del agua, sino en términos de energía en sí. El número 0 se asigna a la temperatura más baja posible, el **cero absoluto**, a la cual una sustancia no tiene absolutamente ninguna energía cinética que ceder.[2] El cero absoluto corresponde a −273°C en la escala Celsius. Las unidades de la escala Kelvin tienen incrementos del mismo tamaño que los grados de la escala Celsius, de modo que la temperatura de la fusión del hielo es 273 K. En la escala Kelvin no hay números negativos. Esta escala no se abordará más sino hasta el estudio de la termodinámica en el Capítulo 18.

Las fórmulas matemáticas que se utilizan para convertir de Fahrenheit a Celsius, y viceversa, son populares en los exámenes en clase. Tales ejercicios aritméticos en realidad no son física, y la probabilidad de que tengas que hacer esta tarea en algún otro lado es pequeña, así que no se tratarán aquí. Además, esta conversión puede calcularse de una manera muy aproximada con sólo leer las temperaturas correspondientes en las escalas que están una al lado de la otra en la Figura 15.2.

La temperatura se relaciona con el movimiento aleatorio de los átomos y las moléculas de una sustancia. (Por concisión, en este capítulo simplemente se dirá *moléculas* para referirse a *átomos y moléculas*.) De manera específica, la temperatura es proporcional a la energía cinética "traslacional" promedio del movimiento molecular aleatorio (movimiento que lleva la molécula de un lugar a otro). Las moléculas también pueden girar o vibrar, con energía cinética rotacional o vibratoria asociada, pero dichos movimientos no son de traslación y no definen la temperatura.

[1]La conversión a Celsius pondría a Estados Unidos en consonancia con el resto del mundo, donde la escala Celsius es el estándar. Pero los estadounidenses son lentos para cambiar. Modificar cualquier costumbre largamente establecida es difícil, y la escala Fahrenheit tiene algunas ventajas en el uso cotidiano. Por ejemplo, sus grados son más pequeños (1 °F = 5/9°C), lo que ofrece mayor exactitud cuando se reporta el clima en lecturas de temperatura con números enteros. Además, las personas atribuyen de algún modo un significado especial a los números que aumentan en un dígito adicional. Por ende, cuando la temperatura de un día caluroso se informa en 100 °F, la idea de calor se transmite de manera más espectacular que si se afirma que la temperatura es 38 °C. Como gran parte del sistema británico de medidas, la escala Fahrenheit se amolda al ser humano.

[2]Incluso en cero absoluto, una sustancia tiene lo que se denomina "energía punto cero", que es la energía no disponible que no puede transferirse a una sustancia diferente. El helio, por ejemplo, tiene suficiente movimiento en cero absoluto como para evitar la congelación. La explicación de esto tiene que ver con la teoría cuántica.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Verdadero o falso? La temperatura es una medida de la energía cinética total en una sustancia.**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Falso. La temperatura es una medida de la energía cinética traslacional *promedio* (¡no *total*!) de las moléculas en una sustancia. Por ejemplo, hay el doble de energía cinética molecular total en 2 L de agua hirviendo que en 1 L, pero las temperaturas de los dos volúmenes de agua son las mismas porque la energía cinética traslacional *promedio* por molécula es la misma en cada uno.

El efecto de la energía cinética traslacional en comparación con el de la energía cinética rotacional y vibratoria se demuestra de una manera espectacular en un horno de microondas. Las microondas que bombardean tu comida hacen que ciertas moléculas de la comida, principalmente las moléculas de agua, se pongan a saltar y oscilen con considerable energía cinética rotacional. Pero las moléculas oscilatorias no cocinan la comida. Lo que aumenta la temperatura y cocina la comida, y rápidamente, es la energía cinética traslacional impartida a las moléculas vecinas que brincan de las moléculas de agua oscilatorias. (Para representar esto, imagina un puñado de canicas que se ponen a volar en todas direcciones después de encontrar las aspas giratorias de un ventilador; consulta también la página 418.) Si las moléculas vecinas no interaccionaran con las moléculas de agua oscilatorias, la temperatura de la comida no sería diferente a la de antes de encender el horno de microondas.

Es interesante que lo que en realidad muestra un termómetro es su *propia* temperatura. Cuando un termómetro está en contacto térmico con algo cuya temperatura se quiere conocer, la energía fluirá entre los dos hasta que sus temperaturas sean iguales y se establezca el equilibrio térmico. Si se conoce la temperatura del termómetro, entonces se conoce la temperatura de lo que se está midiendo. Un termómetro debe ser suficientemente pequeño para no alterar de manera considerable la temperatura de lo que se mide. Si mides la temperatura del aire de una habitación, entonces tu termómetro es suficientemente pequeño. Pero si mides la temperatura de una gota de agua, el contacto entre la gota y el termómetro puede cambiar la temperatura de la gota, un caso clásico del proceso de medición que cambia la cosa que se somete a medición.

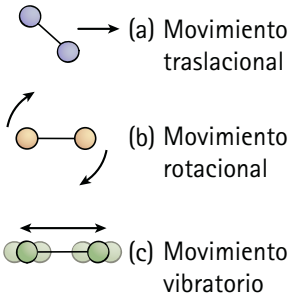



**FIGURA 15.3**
Las partículas de la materia se mueven de diferentes maneras. Se mueven de un lugar a otro, giran y vibran de ida y vuelta. Todos estos tipos de movimiento, más la energía potencial, contribuyen a la energía global de una sustancia. Sin embargo, la temperatura se define mediante el movimiento traslacional.

## 15.2 Calor

Si tocas una estufa caliente, la energía entra en tu mano porque la estufa está más caliente que tu mano. Sin embargo, cuando tocas un trozo de hielo, la energía se transfiere de tu mano al hielo más frío. La dirección de la transferencia espontánea de energía siempre es de un objeto más caliente a un objeto cercano más frío. La energía transferida de un objeto a otro debido a una diferencia de temperatura entre ellos se llama **calor**.

Es importante señalar que la materia no *contiene* calor. Esto lo descubrió Rumford en sus experimentos de perforación de cañones, como se mencionó antes. Rumford y otros investigadores que le siguieron se dieron cuenta de que la materia contenía energía cinética molecular y posiblemente energía potencial, *no calor*. El calor es *energía en tránsito* de un cuerpo de mayor temperatura a uno de menor temperatura. Una vez transferida, la energía deja de ser calor. (A manera de analogía, el trabajo también es energía en tránsito. Un cuerpo no *contiene* trabajo. *Realiza* trabajo o se realiza trabajo sobre él.) En capítulos anteriores, a la energía resultante del flujo de calor se le llamó *energía térmica* para dejar claro su vínculo con el calor y la temperatura. En este capítulo se usará el término que prefieren los científicos, *energía interna*.

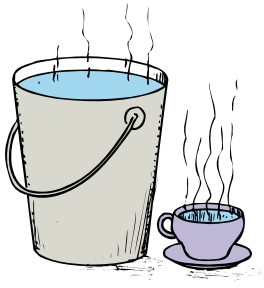


**FIGURA 15.4**
Hay más energía cinética molecular en el recipiente lleno de agua caliente que en la pequeña taza de agua a mayor temperatura.

**SCREENCAST: Calor y temperatura**

**FIGURA 15.5**
Aunque a ambos recipientes se les agrega la misma cantidad de calor, la temperatura aumenta más en el recipiente con la menor cantidad de agua.

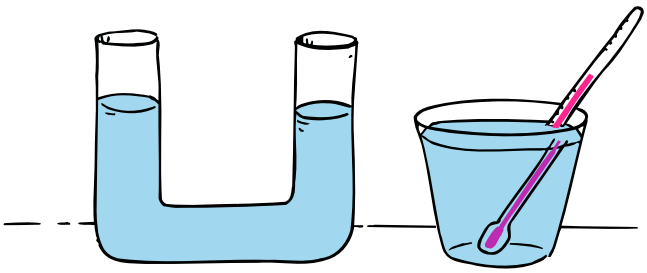
La **energía interna** es el gran total de todas las energías dentro de una sustancia. Además de la energía cinética traslacional de las moléculas que se empujan en una sustancia, hay energía en otras formas. Hay energía cinética rotacional de las moléculas y energía cinética debida a movimientos internos de los átomos en el interior de las moléculas. También hay energía potencial debida a las fuerzas entre las moléculas. De modo que una sustancia no contiene calor, contiene energía interna.

Cuando una sustancia absorbe o cede calor, la energía interna de la sustancia aumenta o disminuye. En algunos casos, como cuando se funde el hielo, el calor agregado no aumenta la energía cinética molecular sino que más bien pasa a otras formas de energía. La sustancia experimenta un cambio de fase, lo que se cubrirá con detalle en el Capítulo 17.

Para dos cosas que están en contacto térmico, el flujo de calor es de la sustancia con mayor temperatura a la sustancia con menor temperatura. Esto no necesariamente es un flujo de una sustancia con más energía interna a una sustancia con menos energía interna. Hay más energía interna en un tazón con agua caliente de la que hay en una tachuela al rojo vivo; sin embargo, si la tachuela se sumerge en el agua, el calor fluye de la tachuela al agua caliente y no de la manera inversa. El calor nunca fluye por sí solo de una sustancia con menor temperatura a una sustancia con mayor temperatura.

Cuánto calor fluye depende no sólo de la diferencia de temperatura entre las sustancias, sino también de la cantidad de material. Por ejemplo, un barril de agua caliente transferirá más calor hacia una sustancia más fría que el que transferirá una taza de agua caliente. Hay más energía interna en el volumen más grande de agua.

**FIGURA 15.6**
Así como el agua en los dos brazos del tubo en U busca un nivel común (donde las presiones a una profundidad dada sean iguales), el termómetro y su entorno inmediato buscan una temperatura común (en la que la EC molecular promedio sea la misma para ambos).



Así como la oscuridad es la ausencia de luz, el frío es la ausencia de energía interna.

**PUNTO DE CONTROL**

1. Supón que aplicas una flama a 1 L de agua durante cierto tiempo y su temperatura se eleva 2°C. Si aplicas la misma flama durante el mismo tiempo a 2 L de agua, ¿en cuánto aumentará su temperatura?
2. Si una canica rápida golpea una dispersión aleatoria de canicas lentas, ¿la canica rápida por lo general acelera o frena? Entre la canica que inicialmente se movía rápido y las canicas inicialmente lentas, ¿cuál(es) pierde(n) energía cinética y cuál(es) gana(n) energía cinética? ¿Cómo se relacionan estas preguntas con la dirección del flujo de calor?

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Su temperatura aumentará sólo en 1°C porque hay el doble de moléculas en 2 L de agua y cada molécula recibe sólo la mitad de energía en promedio.
2. Una canica que se mueve rápidamente frena cuando golpea canicas que se mueven en forma lenta. Transfiere parte de su energía cinética a las canicas más lentas. Lo mismo sucede con el flujo de calor. Las moléculas con más energía cinética que están en contacto con moléculas que tienen menos energía cinética transfieren parte de su energía en exceso a las menos energéticas. La dirección de transferencia de energía es de caliente a frío. Sin embargo, tanto para las canicas como para las moléculas, la energía *total* antes y después del contacto es la misma.

## Medición del calor

Entonces, el calor es el flujo de energía desde una cosa hacia otra debido a una diferencia de temperatura. Dado que la energía térmica está en tránsito, se mide en joules. En Estados Unidos, una unidad de calor más común es la *caloría*. La caloría se define como la cantidad de calor necesaria para cambiar la temperatura de 1 gramo de agua en 1 grado Celsius.[3]

Para determinar las clasificaciones energéticas de los alimentos y los combustibles, se queman y se mide la energía liberada. (Tu cuerpo "quema" alimentos a un ritmo lento.) La unidad de calor usada para etiquetar los alimentos en realidad es la kilocaloría, que son 1,000 calorías (el calor indispensable para elevar la temperatura de 1 kilogramo de agua en 1°C). Para distinguir esta unidad de la caloría más pequeña, la unidad alimenticia en ocasiones se denomina *Caloría* (con *C* mayúscula). Es importante recordar que la caloría y la Caloría son unidades de energía. Estos nombres son portadores históricos de la idea temprana de que el calor es un fluido invisible llamado *calórico*. Esta opinión persistió hasta el siglo XIX, incluso después de que los experimentos de Rumford mostraron lo contrario.

Ahora se sabe que el calor es una forma de transferencia de energía, no una sustancia aparte, de modo que no necesita su propia unidad independiente. Algún día la caloría puede ceder su lugar al joule, una unidad del SI, como la unidad común para medir calor. (La relación entre calorías y joules es que 1 caloría = 4.19 joules.) En este libro aprenderás acerca del calor con la caloría conceptualmente más simple; pero, en el laboratorio, puedes usar el equivalente joule, donde una entrada de 4.19 joules aumenta la temperatura de 1 gramo de agua en 1°C.

La temperatura se mide en grados; el calor se mide en joules.

**FIGURA 15.7**
Para quien cuida su peso, el cacahuate contiene 10 Calorías; para el físico, libera 10,000 calorías (o 41,900 joules) de energía cuando se quema o consume.

**PUNTO DE CONTROL**

**Una tachuela de hierro y un gran tornillo de hierro se retiran de un horno caliente. Ambos están al rojo vivo y tienen la misma temperatura. Cuando se sueltan en idénticos recipientes con agua de igual temperatura, ¿cuál eleva más la temperatura del agua?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

El tornillo grande de hierro tiene más energía interna para impartir al agua y calentarla más que la tachuela. Aunque ambos objetos tienen la misma temperatura inicial (la misma energía cinética *promedio* por molécula), el tornillo más masivo tiene más moléculas y, por tanto, más energía *total*: energía interna. Este ejemplo recalca la diferencia entre temperatura y energía interna.

Tanto el calor como el trabajo son "energía en movimiento": energía que se transfiere de una sustancia a otra. Ambas se miden en unidades de energía, por lo general en joules.

## 15.3 Capacidad calorífica específica

Probablemente has notado que algunos alimentos permanecen más calientes durante más tiempo que otros. Si sacas una tostada de un tostador y viertes sopa caliente en un tazón al mismo tiempo, pocos minutos después la sopa todavía está agradablemente tibia, en tanto que la tostada se habrá enfriado mucho. De igual modo, si esperas poco tiempo antes de comer una rebanada de *roast beef* caliente y una cucharada de puré de papas, ambas inicialmente a la misma temperatura, descubrirás que la carne se ha enfriado más que las papas.

Diferentes sustancias tienen distintas capacidades para almacenar energía interna. Si calientas una cazuela con agua en una estufa, puedes descubrir que se necesitan 15 minutos para que aumente de temperatura ambiente a temperatura de ebullición. Pero si pones una masa igual de hierro sobre la misma flama, descubrirías que pasará por el mismo rango de temperatura en apenas unos dos minutos. Para la plata, el tiempo sería de menos de un minuto.

**FIGURA 15.8**
El relleno de la tarta de manzana caliente puede estar demasiado caliente para comerlo aun cuando la base de pan no lo esté.

[3]Una unidad de calor menos común es la unidad térmica británica (BTU). La BTU se define como la cantidad de calor necesaria para cambiar la temperatura de 1 lb de agua en 1 grado Fahrenheit. Una BTU es igual a 1,054 J.

**SCREENCAST:** Calor especifico

Diferentes materiales necesitan distintas cantidades de calor para aumentar la temperatura de una masa dada del material un número específico de grados. Esto se debe en parte a que diferentes materiales absorben la energía de distintas formas. La energía puede dispersarse entre varios tipos de energía, incluida rotación molecular y energía potencial, que aumentan menos la temperatura. Excepto por casos especiales como el gas helio, la energía siempre se comparte entre diferentes tipos de movimiento, pero en grados variables.

Mientras que 1 gramo de agua necesita 1 caloría de energía para aumentar su temperatura en 1 grado Celsius, se necesita aproximadamente sólo un octavo de esa energía para aumentar la temperatura de un gramo de hierro en la misma cantidad. El agua absorbe más calor por gramo que el hierro para el mismo cambio de temperatura. Se dice que el agua tiene una **capacidad calorífica específica** más alta (en ocasiones simplemente llamada *calor específico*).

**La capacidad calorífica específica de cualquier sustancia se define como la cantidad de calor necesaria para cambiar la temperatura de una unidad de masa de la sustancia en 1 grado Celsius.**

Si agregas 1 caloría de calor a 1 gramo de agua, aumentarás su temperatura en 1°C.

Si se conoce la capacidad calorífica específica $c$, entonces la cantidad de calor $Q$ transferida cuando una masa $m$ de una sustancia experimenta un cambio de temperatura $\Delta T$ es *capacidad calorífica específica* × *masa* × *cambio de temperatura*. En forma de ecuación, $Q = cm\Delta T$.

Se puede pensar en la capacidad calorífica específica como en inercia térmica. Recuerda que *inercia* es un término usado en mecánica para denotar la resistencia de un objeto a cambiar en su estado de movimiento. La capacidad calorífica específica es una especie de inercia térmica porque denota la resistencia de una sustancia a cambiar su temperatura.

## 15.4 La alta capacidad calorífica específica del agua

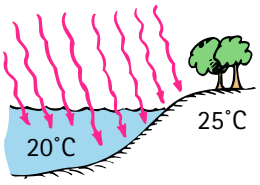



**FIGURA 15.9**
Dado que el agua tiene una alta capacidad calorífica específica y es transparente, se necesita más energía para calentar el agua que para calentar la tierra. La energía solar incidente sobre la tierra se concentra en la superficie, pero como la luz solar sobre el agua se extiende bajo la superficie, entonces se "diluye".

El agua tiene una capacidad mucho más alta para almacenar energía que la mayor parte de los materiales, salvo algunos un tanto inusuales. Una cantidad relativamente pequeña de agua absorbe una gran cantidad de calor por un pequeño aumento de temperatura correspondiente. Debido a esto, el agua es un refrigerante muy útil en los sistemas de enfriamiento de automóviles y otros motores. Si en los sistemas de enfriamiento se usara un líquido de menor capacidad calorífica específica, su temperatura se elevaría más por una absorción similar de calor.

El agua también tarda más tiempo en enfriarse, un hecho que explica por qué, en épocas antiguas, las personas usaban botellas de agua caliente durante las frías noches de invierno. En la actualidad, en muchos lugares, las han sustituido con cobertores eléctricos. Esta tendencia del agua a resistir los cambios de temperatura mejora el clima en muchos lugares. La siguiente vez que mires un globo terráqueo, observa la gran latitud de Europa. Si el agua no tuviera una alta capacidad calorífica específica, los países de Europa serían tan fríos como las regiones del noreste de Canadá, pues tanto Europa como Canadá reciben aproximadamente la misma cantidad de luz solar por kilómetro cuadrado. La corriente atlántica conocida como Corriente del Golfo lleva agua caliente al noreste desde el Caribe. Conserva mucha de su energía interna el tiempo suficiente para llegar al Atlántico norte en la costa de Europa, donde se enfría. La energía liberada, cerca de 1 caloría por grado por cada gramo de agua que se enfría, se transfiere al aire, donde la transportan los vientos del oeste sobre el Continente Europeo.

El clima tiene que ver con el comportamiento promedio, en tanto que el tiempo tiene que ver con las fluctuaciones. El clima es lo que se espera y el tiempo es lo que se obtiene.

Un efecto similar ocurre en Estados Unidos. Los vientos en las latitudes de América del Norte son del oeste. En la costa oeste, el aire se mueve del Océano Pacífico a tierra. Debido a la alta capacidad calorífica específica del agua, un océano no varía mucho en temperatura de verano a invierno. El agua es más cálida que el aire en el invierno y más fría que el aire en el verano. En invierno, el agua calienta el aire que se mueve sobre ella y el aire calienta las regiones costeras de América del Norte. En verano, el agua enfría el aire y las regiones costeras se enfrían. En la costa este, el aire se mueve desde tierra hacia el Océano Atlántico. La tierra, con una capacidad calorífica específica más baja, se calienta en verano pero se enfría con rapidez en el invierno. Como resultado de la alta capacidad calorífica específica

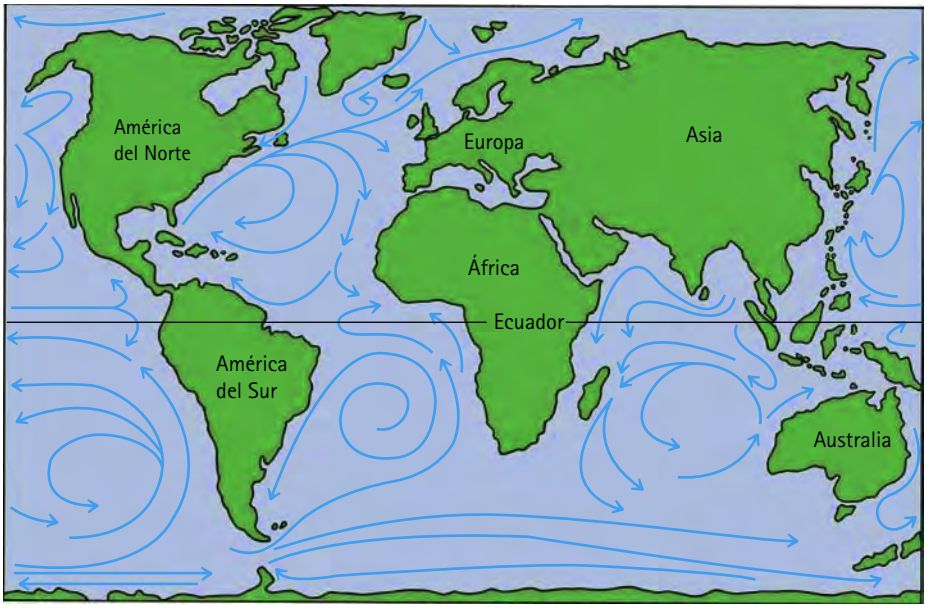



**FIGURA 15.10**
Muchas corrientes oceánicas, mostradas en azul, distribuyen el calor de las regiones ecuatoriales más cálidas a las regiones polares más frías.

del agua y las direcciones de los vientos, la ciudad de San Francisco, en la costa oeste, es más caliente en invierno y más fría en verano que la ciudad de Washington, D.C., en la costa este, que está aproximadamente a la misma latitud.

Las islas y penínsulas que están más o menos rodeadas de agua no tienen los mismos extremos de temperaturas que se observan en el interior de un continente. Cuando el aire es caliente en los meses de verano, el agua lo enfría. Cuando el aire es frío en los meses de invierno, el agua lo calienta. El agua modera los extremos de temperatura. Las temperaturas veraniegas altas e invernales bajas comunes en Manitoba y las Dakotas, por ejemplo, se deben principalmente a la ausencia de grandes cuerpos de agua. Los europeos, los isleños y las personas que viven cerca de las corrientes de aire oceánicas deben estar agradecidos de que el agua tenga tan alta capacidad calorífica específica. ¡Los habitantes de San Francisco lo están!

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Cuál tiene mayor capacidad calorífica específica: el agua o la arena?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

El agua tiene una capacidad calorífica específica más alta. El agua tiene mayor inercia térmica y tarda más tiempo en calentarse a la luz caliente del sol y más tiempo en enfriarse en una noche fría. La arena tiene una baja capacidad calorífica, como lo demuestra lo rápido que se calienta la superficie en la luz solar matutina y lo rápido que se enfría en la noche. (Caminar o correr descalzo por la arena ardiente en el día es una experiencia mucho muy diferente que caminar en la arena fría de la tarde.)

## 15.5 Expansión térmica

Cuando la temperatura de una sustancia aumenta, sus moléculas o átomos se empujan más rápido y se separan más, en promedio. El resultado es una expansión de la sustancia. Con pocas excepciones, todas las formas de materia (sólidos, líquidos, gases y plasmas) por lo general se expanden cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían.

**pti**

- Del mismo modo como en el lado exterior de la plataforma de un tiovivo siempre se viajará más rápido, las personas que viven más cerca del ecuador recorren más distancia en un día, y en consecuencia se mueven más rápido, que las personas que viven más alejadas del ecuador. Cuando los objetos que no están fijos al suelo (como el aire, el agua, los aviones y los misiles balísticos) se mueven hacia el ecuador, no pueden seguir el ritmo de la tierra bajo ellos que se mueve cada vez más rápido. Dado que la Tierra gira hacia el este, estos objetos en movimiento libre quedan rezagados, lo que les da una desviación hacia el oeste. Por el contrario, un objeto con movimiento libre que se aleja del ecuador se desvía hacia el este porque conserva su mayor rapidez dirigida hacia el este. Éste es el *efecto Coriolis*. Así que las corrientes oceánicas que se dirigen hacia el ecuador tienden a desviarse hacia el oeste, en tanto que las corrientes que se alejan del ecuador se desvían hacia el este. Es por eso que las corrientes del hemisferio norte tienden a circular en el sentido de las manecillas del reloj, en tanto que las corrientes del hemisferio sur tienden a circular en sentido contrario a las manecillas del reloj, como se ilustra claramente en la Figura 15.10.

**FIGURA 15.11**
La temperatura de las chispas es muy alta, de aproximadamente 2,000°C. Ésa es mucha energía por molécula de chispa. Sin embargo, debido a las pocas moléculas por chispa, la energía interna es pequeña y no plantea ningún riesgo. La temperatura es una cosa; la transferencia de energía es otra.

**FIGURA 15.12**
Un extremo del puente está fijo, en tanto que el extremo que se muestra se apoya en balancines que permiten la expansión térmica.

En la mayor parte de los casos que involucran sólidos, dichos cambios de volumen no son muy apreciables, pero con una observación cuidadosa generalmente se detectan. Los cables de teléfono se vuelven más largos y se pandean más en un día caluroso de verano que en un día frío de invierno. La tapa metálica de un frasco de vidrio con frecuencia puede aflojarse si se calienta bajo el agua caliente. Si una parte de un pedazo de vidrio se calienta o se enfría más rápidamente que las partes contiguas, la expansión o contracción resultante pueden romper el vidrio, en especial si el vidrio es grueso. Los utensilios de vidrio Pyrex® resistentes al calor son una excepción porque están especialmente formulados para expandirse muy poco con el incremento de temperatura (cerca de un tercio del vidrio ordinario).

La expansión de las sustancias debe considerarse en estructuras y dispositivos de todo tipo. Un dentista utiliza material de relleno que tiene la misma tasa de expansión que los dientes. Los pistones de aluminio de algunos motores automotrices son apenas un poco menores en diámetro que los cilindros de acero para permitir la tasa mucho mayor de expansión del aluminio. Los ingenieros civiles utilizan acero reforzado que tiene la misma tasa de expansión del concreto. Los largos puentes de acero por lo general tienen un extremo fijo en tanto que el otro extremo descansa sobre balancines (Figura 15.12). El puente Golden Gate de San Francisco se contrae más de un metro en clima frío. La carretera está segmentada con brechas del tipo ranura y lengüeta llamadas *juntas de expansión* (Figura 15.13). De igual modo, las calzadas y aceras de concreto están cortadas por brechas, en ocasiones llenas con chapopote, de modo que el concreto pueda expandirse libremente en verano y contraerse en invierno.

**SCREENCAST: Expansión térmica**

**FIGURA 15.13**
Esta brecha en el camino de un puente se denomina junta de expansión; permite la expansión y contracción del puente.

**FIGURA 15.14**
Expansión térmica. El calor extremo de un día de julio causó el pandeo de estas vías de ferrocarril.

Antes, las vías de ferrocarril se tendían en segmentos de 39 pies conectadas mediante bridas, con brechas para expansión térmica. En los meses de verano, las vías se expandían y las brechas eran estrechas. En invierno, las brechas se ensanchaban, lo que ocasionaba un traqueteo más pronunciado cuando los trenes rodaban a lo largo de las vías. En la actualidad no se escucha el traqueteo porque alguien tuvo la brillante idea de eliminar las brechas y soldar las vías. ¿Acaso la expansión en el calor del verano no hace que las vías soldadas se pandeen, como muestra la Figura 15.14? No, ¡si éstas se tienden y sueldan en los días más calurosos del verano! El encogimiento de las vías los días fríos de invierno estira las vías, lo que no causa pandeo. Las vías estiradas están bien.

**SCREENCAST: Cómo funciona un termostato**

Diferentes sustancias se expanden a distintas tasas. Cuando dos tiras de diferentes metales (por decir, una de latón y la otra de hierro) se sueldan o remachan juntas, la mayor expansión de un metal resulta en el doblado de la tira, como se muestra en la Figura 15.15. A esta delgada barra compuesta se le denomina *tira bimetálica*. Cuando la tira se calienta, un lado de la tira doble se hace más largo que el otro, lo que ocasiona que la tira se doble en una curva. Por el contrario, cuando la tira se enfría, tiende a doblarse en la dirección opuesta, porque el metal que se expande más también se encoge más. El movimiento de la tira puede servir para mover un puntero, regular una válvula o cerrar un interruptor. Las tiras bimetálicas se utilizan en termómetros de horno, tostadores eléctricos y varios dispositivos.

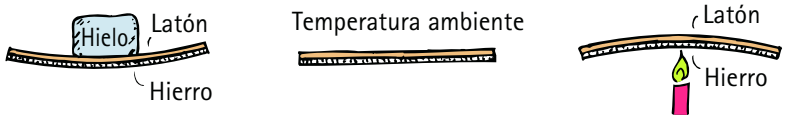



**FIGURA 15.15**
Una tira bimetálica. El latón se expande más cuando se calienta que el hierro y se contrae más cuando se enfría. Debido a este comportamiento, la tira se dobla como se muestra.

Una aplicación práctica de las diferentes tasas de expansión es el termostato (Figura 15.16). El doblado atrás y adelante de la bobina bimetálica abre y cierra un circuito eléctrico. Cuando la habitación se enfría mucho, la bobina se dobla hacia el lado del latón, lo que activa un interruptor eléctrico que enciende la calefacción. Cuando la habitación se calienta mucho, la bobina se dobla hacia el lado del hierro, lo que activa un interruptor eléctrico que apaga la unidad calefactora. Los refrigeradores están equipados con termostatos que impiden que se calienten o se enfríen mucho.

Los líquidos se expanden mucho con el aumento de temperatura. En muchos casos, la expansión de los líquidos es mayor que la expansión de los sólidos. La gasolina que se desborda del tanque de un automóvil en un día caliente es una prueba de esto. Si el tanque y los contenidos se expandieran a la misma tasa, se expandirían juntos y no habría desbordamiento. De igual modo, si la expansión del vidrio de un termómetro fuese tan grande como la expansión del mercurio, el mercurio no se elevaría con el aumento de temperatura. La razón por la que el mercurio de un termómetro se eleva con el aumento de temperatura es que la expansión del mercurio líquido es mayor que la expansión del vidrio.

**FIGURA 15.16**
Un termostato pre-electrónico. Cuando la bobina bimetálica se expande, la gota de mercurio líquido se aleja de los contactos eléctricos y rompe el circuito eléctrico. Cuando la bobina se contrae, el mercurio rueda contra los contactos y completa el circuito.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Por qué es aconsejable dejar que las líneas telefónicas se pandeen cuando se tienden entre postes en verano?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Las líneas telefónicas son más largas en verano, cuando están más calientes, y más cortas en invierno, cuando están más frías. En consecuencia, se pandean más en los días calurosos de verano que en invierno. Si las líneas telefónicas no se tienden con suficiente pandeo en verano, pueden contraerse demasiado y romperse durante el invierno.

**FIGURA 15.17**
Coloca una bola de ping-pong abollada en agua hirviendo y eliminarás la abolladura. ¿Por qué?

## Expansión del agua

El agua, como la mayoría de las demás sustancias, se expande cuando se calienta. Pero, es interesante que *no* se expanda en el rango de temperatura entre 0°C y 4°C. En este rango sucede algo fascinante. El hielo tiene una estructura cristalina, con cristales de estructura abierta. Las moléculas de agua de esta estructura abierta ocupan un mayor volumen que en la fase líquida (Figura 15.18). Esto significa que el hielo es menos denso que el agua.

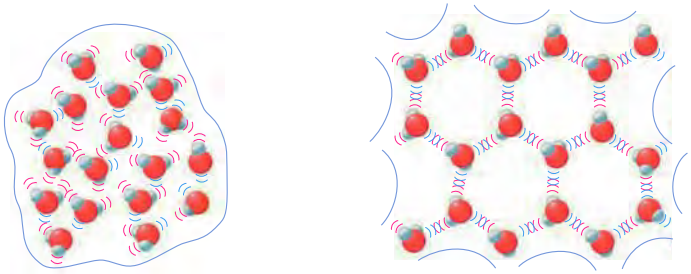



**FIGURA 15.18**
El agua líquida es más densa que el hielo porque las moléculas de agua de un líquido están más juntas que las moléculas de agua congeladas del hielo, donde tienen una estructura cristalina abierta.

**pti**

- Los copos de nieve se forman principalmente de vapor de agua más que de agua líquida. Los copos de nieve verdaderamente simétricos son la excepción, en vez de la regla. Muchos mecanismos interrumpen el crecimiento perfecto de los copos de nieve. En 1611, el astrónomo Kepler escribió un artículo sobre los copos de nieve de seis puntas. Cincuenta y cuatro años después, el físico Roberto Hooke utilizó su primer microscopio para dibujar las formas de los copos de nieve.

**SCREENCAST: Expansión térmica del agua**

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Qué hay dentro de los espacios abiertos de los cristales de agua que se muestran en las Figuras 15.18 y 15.19? ¿Es aire, vapor de agua o nada?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

En los espacios abiertos no hay absolutamente nada. Es espacio vacío. Si hubiera aire o vapor en los espacios abiertos, la ilustración debería mostrar moléculas ahí: oxígeno y nitrógeno para el aire y $H_2O$ para el vapor de agua.

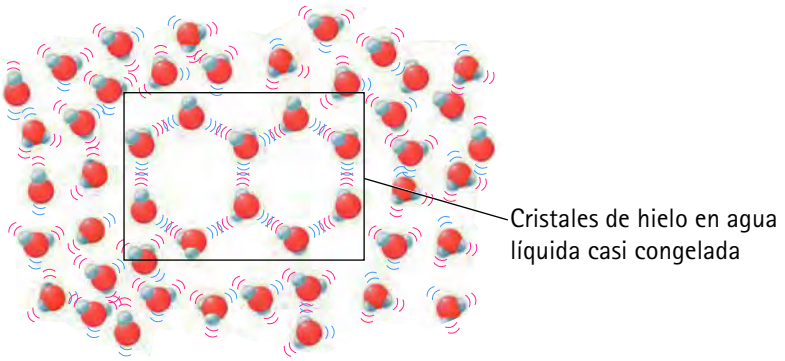



**FIGURA 15.19**
La estructura abierta de los cristales de hielo tridimensionales que se forman a medida que el agua se congela crea un aguanieve microscópica que aumenta un poco el volumen del agua.

**pti**

- ¿Cómo es que la sal de roca esparcida sobre los caminos helados en invierno ayuda a fundir el hielo? Resulta que la sal en agua se separa en iones de sodio y cloro que, cuando se unen a las moléculas de agua, ceden energía que funde las partes microscópicas de una superficie helada. La presión de los automóviles que ruedan sobre la superficie helada cubierta de sal hace que la sal penetre en el hielo, lo que intensifica el proceso de fusión. La única diferencia entre la sal de roca y la sal que rocías sobre las rosetas de maíz es el tamaño de los cristales.

Cuando el hielo se funde, no todos los cristales de estructura abierta colapsan. Algunos cristales microscópicos permanecen en la mezcla hielo-agua, lo que constituye un aguanieve que "hincha" un poco el agua y aumenta su volumen ligeramente (Figura 15.19). Esto da por resultado agua de hielo que es menos densa que el agua y un poco más caliente. A medida que la temperatura del agua a 0°C aumenta, más de los cristales de hielo restantes colapsan. Cuando dichos cristales se funden, disminuye aún más el volumen del agua. El agua experimenta dos procesos al mismo tiempo: expansión y contracción (Figura 15.20). El volumen tiende a aumentar debido al mayor movimiento molecular con el aumento de temperatura, mientras que el volumen a cerca de 0°C disminuye a medida que los cristales de hielo colapsan al fundirse. El efecto de colapso domina hasta que la temperatura alcanza 4°C. Después de esto, la expansión supera a la contracción porque la mayor parte de los cristales de hielo microscópicos se fundieron para entonces (Figura 15.21).

Cuando el agua de hielo se congela y se convierte en hielo sólido, su volumen aumenta en casi 10% y su densidad se reduce. Es por esto por lo que el hielo flota en el agua. Como la mayoría de las demás sustancias, el hielo sólido se contrae con un mayor enfriamiento. Este comportamiento del agua es muy importante en la naturaleza. Si el agua fuese más densa a 0°C, se asentaría en el fondo de un estanque o lago. Sin embargo, el agua a 0°C, es menos densa y "flota" en la superficie. Qué bueno que el hielo se forma en la superficie.

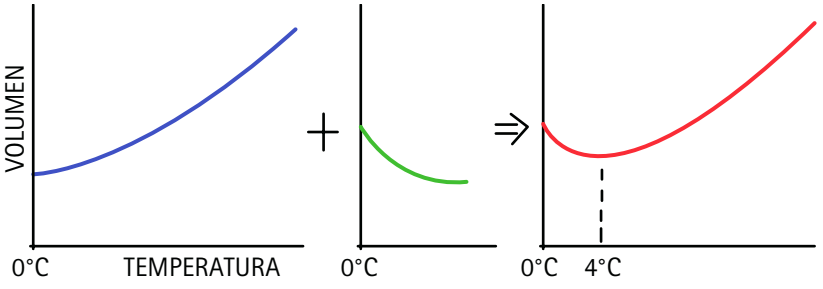



**FIGURA 15.20**
La curva azul indica la expansión normal del agua con el aumento de temperatura. La curva verde indica la contracción de los cristales de hielo en agua de hielo a medida que se funden con el aumento de temperatura. La curva roja muestra el resultado de ambos procesos.

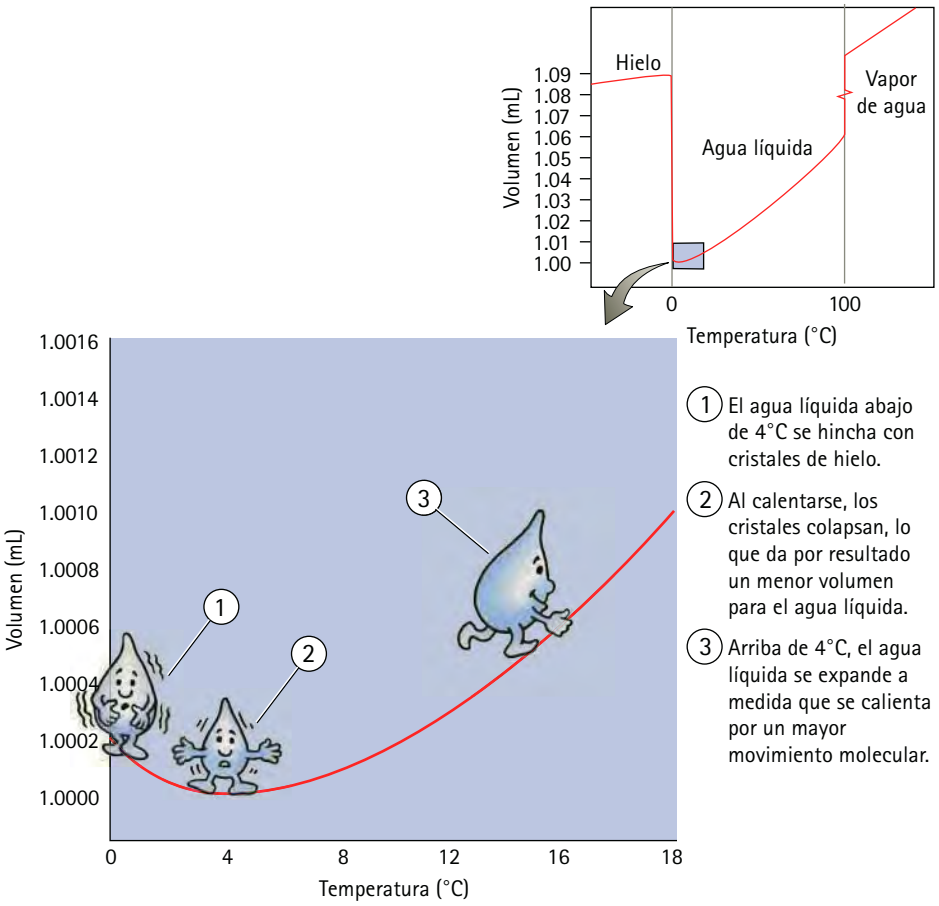



**FIGURA 15.21**
Entre 0 y 4°C, el volumen del agua líquida disminuye a medida que aumenta la temperatura. Arriba de 4°C, el agua se comporta de la forma en que lo hacen otras sustancias: su volumen se incrementa cuando su temperatura aumenta. Los volúmenes mostrados aquí son para una muestra de 1 gramo.

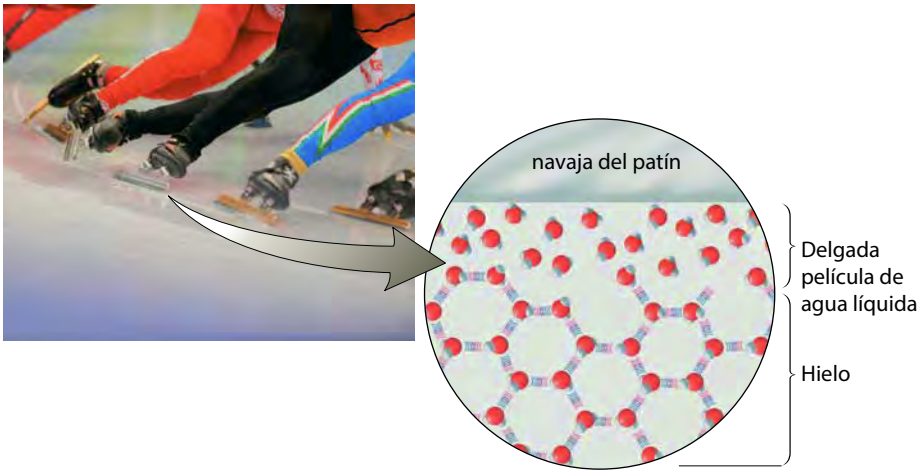
## VIDA EN LOS EXTREMOS

Algunos desiertos, como los de las planicies de España, el Sahara en África y el Gobi en Asia Central, alcanzan temperaturas superficiales de 60°C (140°F). ¿Demasiado caliente para la vida? No para ciertas especies de hormigas del género *Cataglyphis*, que proliferan a esta temperatura abrasadora. A esta temperatura extremadamente alta, las hormigas del desierto pueden forrajear alimentos sin el peligro de la presencia de lagartijas, que de otro modo las capturarían. Resistentes al calor, dichas hormigas pueden soportar temperaturas más altas que cualquier otra criatura en el desierto (excepto los microbios). Es tema actual de investigación cómo pueden hacer esto. Hurgan en la superficie del desierto en busca de los cadáveres de aquellas criaturas que no encontraron refugio a tiempo y tocan la arena caliente lo menos posible al tiempo que corren rápidamente pequeños tramos en cuatro patas y dos las mantienen en el aire. Aunque sus rutas de forrajeo son en zigzag sobre el suelo del desierto, sus rutas de regreso casi siempre son líneas rectas a sus nidos. Logran rapideces de 100 cuerpos de largo por segundo. Durante una vida promedio de seis días, la mayoría de estas hormigas recupera de 15 a 20 veces su peso en alimentos.

De los desiertos a los glaciares, una variedad de criaturas han inventado formas de sobrevivir en los rincones más hostiles del mundo. Una especie de gusano prolifera en el hielo glacial del Ártico. Hay insectos en el hielo antártico que bombean en todo su cuerpo anticongelante para evitar convertirse en hielo sólido. Algunos peces que viven bajo el hielo pueden hacer lo mismo. También hay bacterias que proliferan en manantiales de agua hirviendo gracias a que tienen proteínas resistentes al calor.

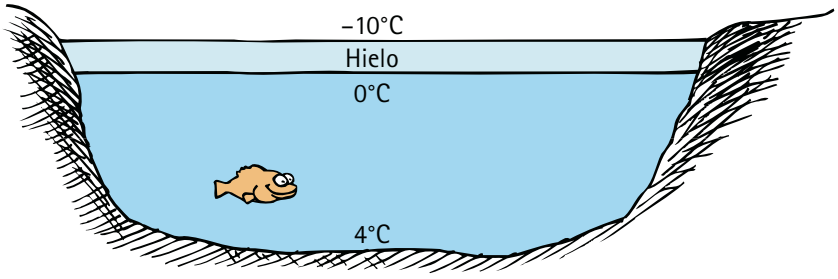
Si se comprende la manera como algunas criaturas sobreviven en los extremos de temperatura, se pueden tener indicios de cómo encontrar soluciones prácticas a los problemas físicos que enfrenta el ser humano. Los astronautas que se aventuren lejos de la Tierra, por ejemplo, necesitarán todas las técnicas disponibles para hacer frente a ambientes desconocidos.

**FIGURA 15.22**
El hielo es resbaloso porque su estructura cristalina no se mantiene con facilidad en la superficie.




De modo que un estanque se congela de la superficie hacia abajo. En un invierno frío, el hielo será más grueso que en un invierno más moderado. La temperatura del agua en el fondo de un estanque cubierto de hielo es de 4°C, lo que es relativamente cálido para los organismos que viven ahí. Es interesante que los estanques y lagos muy profundos por lo general no estén cubiertos de hielo ni siquiera en los inviernos más fríos. Esto se debe a que toda el agua debe enfriarse a 4°C antes de poder alcanzar temperaturas más bajas. En el caso del agua profunda, el invierno no es lo suficientemente prolongado como para reducir todo un estanque a 4°C. Toda el agua que está a 4°C se encuentra en el fondo. Debido a la alta capacidad calorífica específica del agua y a su mala capacidad de conducir el calor, el fondo de un cuerpo de agua profundo en una región fría permanece a unos 4°C constantes todo el año. Los peces deben estar agradecidos de que esto sea así.

**FIGURA 15.23**
A medida que el agua se enfría en la superficie, se hunde hasta que la temperatura de todo el lago es de 4°C. Sólo entonces el agua superficial puede enfriarse a 0°C sin hundirse. Una vez formado el hielo, las temperaturas abajo de 4°C pueden extenderse hacia abajo del lago.




## PUNTO DE CONTROL

1. **¿Cuál fue la temperatura precisa del fondo del lago Michigan, donde el agua es profunda y los inviernos largos, la noche de año nuevo de 1901?**
2. **¿Por qué a los peces les conviene que el agua sea más densa a 4°C?**

### COMPRUEBA TU RESPUESTAS

1. 4°C, porque la temperatura del fondo de cualquier cuerpo de agua que contenga cualquier agua a 4°C tiene una temperatura en el fondo de 4°C, por la misma razón que las rocas están en el fondo. Las rocas son más densas que el agua y el agua a 4°C es más densa que el agua a cualquiera otra temperatura. Así que tanto rocas como agua a 4°C se hunden hasta el fondo. El agua también es un mal conductor del calor, de modo que si el cuerpo de agua es profundo y está en una región de inviernos largos y veranos cortos, es probable que el agua del fondo permanezca a 4°C constantes todo el año.
2. Dado que el agua es más densa a 4°C, el agua más fría se eleva y congela sobre la superficie, ¡lo que significa que los peces permanecen en relativo calor!

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Temperatura.** Una medida de la energía cinética traslacional promedio por molécula en una sustancia, medida en grados Celsius o Fahrenheit o Kelvins (K).

**Cero absoluto.** La temperatura más baja posible que puede tener una sustancia: la temperatura a la cual las moléculas de la sustancia tienen su mínima energía cinética.

**Calor.** La energía que fluye de una sustancia de mayor temperatura a una sustancia de menor temperatura y que suele medirse en calorías o en joules.

**Energía interna.** El total de todas las energías moleculares, cinética más potencial, que son internas a una sustancia.

**Capacidad calorífica específica.** Cantidad de calor por unidad de masa necesaria para aumentar la temperatura de una sustancia en 1 grado Celsius.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 15.1 Temperatura

1. ¿Cuáles son las temperaturas para la congelación del agua en las escalas Celsius y Fahrenheit? ¿Para el agua en ebullición?
2. ¿Cuáles son las temperaturas para la congelación del agua y la ebullición del agua en la escala de temperatura Kelvin?
3. ¿Qué se entiende por energía cinética "traslacional"?
4. ¿Cuál forma de energía determina la temperatura: la energía cinética traslacional, la energía cinética rotacional, la energía cinética vibratoria o todas ellas?
5. ¿Bajo qué condiciones puede decirse que "un termómetro mide su propia temperatura"?

### 15.2 Calor

6. ¿Existe alguna diferencia entre energía térmica y energía interna? ¿Qué término prefieren los físicos?
7. ¿En qué dirección fluye la energía interna entre objetos calientes y fríos?
8. ¿Un objeto caliente contiene energía interna o contiene calor?
9. ¿Cómo difiere el calor de la energía interna, o son dos términos para la misma cosa?
10. ¿Qué importancia tiene la temperatura en la dirección de flujo de la energía interna?
11. ¿Cómo se determina el valor energético de los alimentos?
12. Distingue entre una caloría y una Caloría.
13. Distingue entre una caloría y un joule.
14. ¿Cuántos joules se necesitan para cambiar la temperatura de 1 gramo de agua en 1°C?

### 15.3 Capacidad calorífica específica

15. ¿Qué se calienta más rápido cuando se aplica calor: el hierro o la plata?
16. ¿Una sustancia que se calienta rápidamente tiene capacidad calorífica específica alta o baja?
17. ¿Una sustancia que se enfría rápidamente tiene capacidad calorífica específica alta o baja?

### 15.4 La alta capacidad calorífica específica del agua

18. ¿Cómo se compara la capacidad calorífica específica del agua con las capacidades caloríficas específicas de otros materiales comunes?
19. El noreste de Canadá y gran parte de Europa reciben aproximadamente la misma cantidad de luz solar por unidad de área. ¿Por qué, entonces, generalmente Europa es más cálida en el invierno?
20. De acuerdo con la ley de conservación de la energía, si el agua de los océanos se enfría, algo más debe calentarse. ¿Qué es lo que se calienta?
21. ¿Por qué la temperatura es bastante constante en las grandes áreas de tierra rodeadas de grandes cuerpos de agua?

### 15.5 Expansión térmica

22. ¿Por qué las sustancias se expanden cuando su temperatura aumenta?
23. ¿Por qué una tira bimetálica se dobla con los cambios de temperatura?
24. ¿Cuáles generalmente se expanden más con un aumento igual de temperatura: los sólidos o los líquidos?
25. Cuando la temperatura del agua de hielo aumenta un poco, ¿experimenta una expansión neta o una contracción neta?
26. ¿Cuál es la razón por la que el hielo es menos denso que el agua?
27. ¿El "aguanieve microscópico" en el agua tiende a hacerla más densa o menos densa?
28. ¿Qué ocurre con la cantidad de "aguanieve microscópico" en el agua fría cuando su temperatura aumenta?
29. ¿A qué temperatura los efectos combinados de contracción y expansión producen el menor volumen para el agua?
30. ¿Por qué toda el agua de un lago tiene que enfriarse a 4°C antes de que el agua superficial pueda enfriarse por abajo de 4°C?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

31. ¿Cuánta energía hay en una nuez? Quémala y descúbrelo. El calor proveniente de la flama es energía liberada cuando el carbono y el hidrógeno de la nuez se combinan con el oxígeno del aire (reacciones de oxidación) para producir $CO_2$ y $H_2O$. Perfora una nuez (mitades de pecana o de nuez de castilla funcionan mejor) con un clip doblado que mantenga la nuez arriba de la superficie de la mesa. Encima de esto, asegura una lata de agua de modo que

puedas medir su cambio de temperatura cuando arda la nuez. Usa aproximadamente $10^3$ cm (10 mL) de agua y un termómetro Celsius. En cuanto enciendas la nuez con un fósforo, coloca la lata de agua encima de ella y registra el aumento de temperatura del agua una vez que se extinga la flama. El número de calorías liberadas por la nuez quemada puede calcularse con la fórmula $Q = cm\Delta T$, donde $c$ es su calor específico (1 cal/g·°C), $m$ es la masa del agua y $\Delta T$ es el cambio de temperatura. La energía de los alimentos se expresa en términos de la Caloría, que son 1,000 de las calorías que tú medirás. De modo que, para encontrar el número de Calorías, divide tu resultado entre 1,000. (Consulta el Piensa y resuelve número 36.)

32. Escribe una carta a tus abuelos donde describas cómo aprendiste a ver relaciones que hay en la naturaleza y que hasta ahora se te habían escapado y cómo aprendes a distinguir ideas relacionadas. Usa la temperatura y el calor como ejemplos.

## SUSTITUYE Y LISTO (FAMILIARIZACIÓN CON ECUACIONES)

*La cantidad de calor Q liberado o absorbido por una sustancia con calor específico c (que puede expresarse en unidades* cal/g·°C *o* J/kg·°C*) y masa m (en* g *o* kg*) que experimenta un cambio en temperatura ΔT es:*

$$Q = cm\Delta T$$

33. Usa la fórmula para demostrar que se necesitan 3,000 cal para aumentar la temperatura de 300 g de agua de 22°C a 30°C. Para la capacidad calorífica específica $c$, usa 1 cal/g·°C.
34. Usa la misma fórmula para demostrar que se necesitan 12,570 joules para aumentar la temperatura de la misma masa (0.30 kg) de agua por el mismo intervalo de temperatura. Para la capacidad calorífica específica $c$, usa 4,190 J/kg·°C.
35. Demuestra que 3,000 cal = 12,570 J, la misma cantidad de energía térmica en diferentes unidades.

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

36. Will Maynez quema un cacahuate de 0.6 g debajo de 50 g de agua, que aumenta su temperatura de 22 a 50°C. (La capacidad calorífica específica del agua es 1.0 cal/g·°C.)
    a. Si supones que 40% del calor liberado por el cacahuate que arde llega al agua (40% de eficiencia), demuestra que el valor alimenticio del cacahuate es de 3,500 calorías (equivalente a 3.5 Calorías).
    b. Luego demuestra que el valor alimenticio en calorías por gramo es 5.8 kcal/g (o 5.8 Cal/g).

37. Si quieres calentar 50 kg de agua en 20°C para tu ducha, demuestra que la cantidad de calor necesario es 1,000 kcal (1,000 Cal). Luego demuestra que esto es equivalente a aproximadamente 4,200 kJ.
38. La capacidad calorífica específica del acero es 450 J/kg·°C. Demuestra que la cantidad de calor necesario para subir la temperatura de un trozo de acero de 10 kg de 0 a 100°C es 450,000 J. ¿Cómo se compara esto con el calor necesario para aumentar la temperatura de la misma masa de agua a través de la misma diferencia de temperatura?

*Para resolver los siguientes problemas, deberás conocer el coeficiente de expansión lineal promedio, α, que difiere para distintos materiales. Se define α como el cambio de longitud (L) por unidad de longitud, o el cambio fraccional de longitud, para un cambio de temperatura de 1°C; esto es, ΔL/L por °C. Para el aluminio,* $\alpha = 24 \times 10^{-6}$*/°C, y para el acero,* $\alpha = 11 \times 10^{-6}$*/°C. El cambio de longitud ΔL de un material está dado por* $\Delta L = \alpha \Delta T$.

39. Considera una barra de 1 m de largo que se expande 0.6 cm cuando se calienta. Demuestra que, cuando se calienta igualmente, una barra de 100 m del mismo material adquiere una longitud de 100.6 m.
40. Supón que el tramo principal de acero de 1.3 km del puente Golden Gate no tiene juntas de expansión. Demuestra que, para un aumento en temperatura de 20°C, el puente sería casi 0.3 m más largo.
41. Imagina una tubería de acero de 40,000 km que forma un anillo que se ajusta ceñidamente en torno a la circunferencia de la Tierra. Supón que las personas a lo largo de su longitud respiran sobre él de modo que aumentan su temperatura en 1°C. La tubería se vuelve más larga y ya no está ajustada. ¿Cuán alto se encuentra sobre el nivel del suelo? ¡Demuestra que la respuesta es sorprendentemente 70 m más alto! (Para simplificar, considera sólo la expansión de su distancia radial respecto del centro de la Tierra y aplica la fórmula geométrica que relaciona la circunferencia $C$ con el radio $r$: $C = 2\pi r$.)

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

42. Clasifica las magnitudes de estas unidades de energía térmica, de mayor a menor:
    a. 1 caloría
    b. 1 Caloría
    c. 1 joule
43. Tres bloques de metal a la misma temperatura se colocan sobre una estufa caliente. Sus capacidades caloríficas específicas se mencionan abajo. Clasifícalas de mayor a menor por la rapidez con que se calienta cada uno.
    a. Acero, 450 J/kg·°C
    b. Aluminio, 910 J/kg·°C
    c. Cobre, 390 J/kg·°C
44. El cambio de longitud de varias sustancias con los cambios de temperatura está dado por sus coeficientes de expansión lineal, $\alpha$. Cuanto mayor sea el valor de $\alpha$, mayor será el cambio de longitud para un cambio dado de temperatura. Tres tipos de alambres metálicos, A, B y C, se estiran entre postes telefónicos distantes. De mayor a menor, clasifica los alambres de acuerdo con cuánto se pandearán en un día caluroso.
    a. Cobre, $\alpha = 17 \times 10^{-6}/°C$
    b. Aluminio, $\alpha = 24 \times 10^{-6}/°C$
    c. Acero, $\alpha = 11 \times 10^{-6}/°C$
45. El volumen preciso del agua en un vaso de precipitados depende de la temperatura del agua. Clasifica, de mayor a menor, los volúmenes de agua a estas temperaturas:
    a. 0°C
    b. 4°C
    c. 10°C

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

46. En una sala de juntas hay sillas, una mesa y gente. ¿Cuál de estas cosas tiene una temperatura (a) menor que, (b) mayor que o (c) igual a la temperatura del aire?
47. ¿Cuál es mayor: un aumento de temperatura de 1 grado Celsius o un aumento de 1 grado Fahrenheit?
48. En un vaso con agua a temperatura ambiente, ¿todas las moléculas tienen la misma rapidez?
49. ¿Por qué no esperarías que todas las moléculas de un gas tengan la misma rapidez?
50. ¿Por qué no puedes establecer si tienes temperatura alta cuando te tocas la frente?
51. ¿Cuál tiene más energía cinética: una molécula en un gramo de agua de hielo o una molécula en un gramo de vapor? Defiende tu respuesta.
52. ¿Cuál tiene mayor cantidad de energía interna: un *iceberg* o una taza de café caliente? Defiende tu respuesta.
53. Cuando un termómetro de mercurio se calienta, el mercurio se expande y eleva en el delgado tubo de vidrio. ¿Qué indica esto acerca de las tasas relativas de expansión para el mercurio y el vidrio? ¿Qué sucedería si sus tasas de expansión fueran iguales?
54. ¿Cuál es la unidad más grande de transferencia de calor: la Caloría, la caloría o el joule?
55. Imagina dos vasos, uno lleno de agua y el otro medio lleno, y el agua de los dos vasos a la misma temperatura. ¿En cuál vaso las moléculas de agua se mueven más rápido? ¿En cuál hay mayor energía interna? ¿En cuál se necesitará más calor para aumentar la temperatura en 1°C?
56. Los termómetros de un laboratorio de física con frecuencia usan gas en lugar de mercurio. Mientras que los cambios de volumen indican la temperatura en un termómetro de mercurio, ¿qué cambios en un gas crees que indiquen la temperatura en un termómetro de gas?
57. ¿Por qué la presión del gas encerrado en un recipiente rígido aumenta con la temperatura?
58. Agregar la misma cantidad de calor a dos objetos diferentes de la misma masa no necesariamente produce el mismo aumento de temperatura. ¿Por qué no?
59. Se suministra determinada cantidad de calor tanto a un kilogramo de agua como a un kilogramo de hierro. ¿Cuál experimenta el mayor cambio de temperatura? Defiende tu respuesta.
60. ¿Cuál probablemente tiene la mayor capacidad calorífica específica: un objeto que se enfría rápido o un objeto de la misma masa que se enfría más lentamente?
61. Si la capacidad calorífica específica del agua fuese menor, ¿un agradable baño caliente sería una experiencia más prolongada o más corta?
62. ¿Por qué una rebanada de sandía permanece fría durante más tiempo que los emparedados cuando ambos se sacan de la nevera portátil en un día caluroso?
63. El alcohol etílico tiene aproximadamente la mitad de la capacidad calorífica específica del agua. Si a iguales masas de cada uno, a la misma temperatura, se les aplica igual cantidad de calor, ¿cuál experimentará mayor cambio de temperatura?
64. Cuando una cacerola metálica de 1 kg que contiene 1 kg de agua fría se saca del refrigerador y se pone en la mesa, ¿cuál absorbe más calor de la habitación: la cacerola o el agua?
65. En épocas pasadas, en una fría noche de invierno, era común llevar consigo objetos calientes a la cama. ¿Cuál te mantendría más caliente durante la noche helada: un bloque de hierro de 10 kg o una jarra de agua caliente de 10 kg a la misma temperatura? Explica.
66. Bermudas está aproximadamente tan al norte del ecuador como Carolina del Norte pero, a diferencia de Carolina del Norte, tiene un clima subtropical todo el año. ¿Por qué esto es así?
67. Islandia,* llamada así para desalentar la conquista por parte de los imperios expansionistas, no está para nada cubierta de hielo, como Groenlandia y partes de Siberia, aun cuando no está lejos del círculo ártico. La temperatura invernal promedio de Islandia es mucho mayor que en regiones a la misma latitud en Groenlandia oriental y Siberia central. ¿Por qué esto es así?

*N.T. Islandia corresponde al inglés *Iceland*, que significa tierra de hielo.

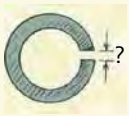
68. ¿Por qué la presencia de grandes cuerpos de agua tiende a moderar el clima de la tierra cercana, a hacerla más cálida en clima frío y más fría en clima cálido?
69. Si los vientos en la latitud de San Francisco y Washington, D.C., provinieran del este en lugar del oeste, ¿por qué San Francisco sólo podría cultivar cerezos y Washington, D.C., tanto cerezos como palmeras?
70. La arena del desierto es muy caliente en el día y muy fría en la noche. ¿Qué indica esto acerca de su capacidad calorífica específica?
71. Cita una excepción a la afirmación de que todas las sustancias se expanden cuando se calientan.
72. ¿Una tira bimetálica funcionaría si los dos diferentes metales tuvieran las mismas tasas de expansión? ¿Es importante que se expandan a diferentes tasas? Explica.
73. Las placas de acero usualmente se unen entre ellas con remaches, que se deslizan en orificios en las placas y se redondean con martillos. La alta temperatura de los remaches los hace más fáciles de redondear, pero su temperatura elevada tiene otra ventaja importante para proporcionar un buen ajuste. ¿Cuál es?
74. Un antiguo método para romper rocas era ponerlas al fuego y luego rociarlas con agua fría. ¿Por qué esto fracturaba las rocas?
75. Después de conducir un automóvil cierta distancia, ¿por qué la presión del aire en los neumáticos aumenta?
76. En las noches frías, en ocasiones se escuchan ruidos de quejidos estructurales en los áticos de los edificios viejos. Ofrece una explicación en términos de expansión térmica.
77. Un antiguo remedio para separar un par de vasos anidados que quedan pegados es correr agua a diferentes temperaturas en el vaso interior y sobre la superficie del vaso exterior. ¿Cuál agua debe ser caliente y cuál fría?
78. ¿Por qué es importante que los espejos de vidrio que se utilizan en los observatorios astronómicos estén hechos de vidrio con un "coeficiente de expansión" bajo?
79. En términos de expansión térmica, ¿por qué es importante que una llave y su cerradura estén hechos del mismo o de materiales similares?
80. Cualquier arquitecto te dirá que las chimeneas nunca se usan como parte de un muro de carga. ¿Por qué?
81. Observa la junta de expansión en la fotografía de la Figura 15.13. ¿Dirías que la fotografía se tomó en un día caluroso o en un día frío? ¿Por qué?
82. ¿Tú o la compañía de gas ganarían por tener gas caliente antes de que éste pase por tu medidor?
83. Después de llenar tu tanque de gasolina hasta el borde y estacionar tu automóvil en luz solar directa, ¿por qué se desborda la gasolina?
84. Cuando un termómetro de mercurio se calienta, el nivel del mercurio momentáneamente baja antes de subir. ¿Puedes dar una explicación de esto?
85. ¿Por qué las largas tuberías de vapor con frecuencia tienen una o más secciones relativamente largas con forma de U?
86. ¿Por qué las bombillas incandescentes por lo general están hechas de vidrio muy delgado?
87. Una de las razones por las que las primeras bombillas eran costosas se debía a los alambres conductores de platino del interior de la bombilla, necesarios porque su expansión coincidía con la del vidrio cuando se calentaba. ¿Por qué es importante que el metal conductor y el vidrio tengan el mismo coeficiente de expansión?
88. ¿Cuál fue la temperatura precisa del fondo del lago Superior a las 12:01 a.m. del 31 de diciembre de 2013?
89. Supón que en un termómetro se usa agua en lugar de mercurio. Si la temperatura está a 4°C y luego cambia, ¿por qué el termómetro no puede indicar si la temperatura sube o baja?
90. Un trozo de hierro sólido se hunde en un contenedor de hierro fundido. Un trozo de aluminio sólido se hunde en un contenedor de aluminio fundido. ¿Por qué un trozo de agua sólida (hielo) no se hunde en un contenedor de agua "fundida" (líquida)? Explica usando términos moleculares.
91. ¿Qué ocurre con el volumen del agua a medida que se enfría de 3°C a 1°C?
92. Establece si el agua a las siguientes temperaturas se expandirá o contraerá cuando se caliente un poco: 0°C, 4°C, 6°C.
93. ¿Por qué es importante proteger las tuberías de agua en el invierno de modo que no se congelen?
94. Si el agua tuviera una capacidad calorífica específica más baja, ¿los estanques tendrían más o menos probabilidad de congelarse?
95. Si el enfriamiento ocurriera en el fondo de un estanque en lugar de en la superficie, ¿el estanque se congelaría desde el fondo hacia arriba? Explica.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

96. Si sueltas una roca caliente en un balde con agua, la temperatura de la roca y el agua cambiarán hasta que ambas sean iguales. La roca se enfriará y el agua se calentará. ¿Esto es verdadero si la roca caliente se suelta en el Océano Atlántico? Discute.
97. ¿Esperarías que la temperatura del agua del fondo de las cataratas del Niágara sea un poco mayor que la temperatura de la parte superior de las cataratas? ¿Por qué?
98. El calor agregado a una sustancia en parte se va a la energía cinética traslacional de sus moléculas, lo que directamente aumenta la temperatura. Para algunas sustancias, grandes proporciones de calor también se van a vibraciones y rotaciones de las moléculas. Discute si esperarías que los materiales en los que mucha energía se va en movimientos moleculares no traslacionales tuvieran una capacidad calorífica específica alta o baja.
99. Una bola metálica apenas logra pasar por un anillo metálico. Sin embargo, cuando Anette aumenta la temperatura de la bola, no pasará por el anillo. ¿Qué sucedería si, en vez de aumentar la temperatura de la bola, aumenta la del anillo? Discute si el tamaño del agujero aumenta, permanece igual o disminuye.

100. Considera un par de bolas de latón del mismo diámetro, una hueca y la otra sólida. Ambas se calientan con igual aumento de temperatura. Discute y compara los diámetros de las bolas calentadas.
101. Después de que un maquinista desliza rápidamente un anillo de hierro caliente que aprieta de forma ajustada sobre un cilindro de latón muy frío, los dos no pueden separarse intactos. Analiza por qué esto es así.

102. Supón que cortas una pequeña brecha en un anillo metálico. Si fueras a calentar el anillo, discute si la brecha se volvería más ancha o más estrecha.




103. Después de medir las dimensiones de un terreno con una cinta de acero en un día caluroso, regresas y vuelves a medir el mismo terreno en un día frío. ¿En cuál día determinas mayor área para el terreno?
104. En la Figura 15.21 ¿cómo diferiría la forma de la curva 0°C a 18°C si, en lugar del volumen se graficara la densidad contra la temperatura? Realiza un dibujo aproximado.
105. Discute cómo se compara el volumen combinado de miles y miles de millones de espacios hexagonales abiertos de las estructuras de los cristales de hielo de un trozo de hielo, con la porción de hielo que flota sobre la línea de agua.

16

CAPÍTULO 16

# Transferencia de calor


16.1 Conducción
16.2 Convección
16.3 Radiación
16.4 Ley de Newton de enfriamiento
16.5 El efecto invernadero
16.6 Cambio climático
16.7 Energía solar
16.8 Cómo controlar la transferencia de calor

1 Este par de fotografías muestran a la ingeniera aeroespacial Helen Yan, cuando era mi alumna en la década de 1980, quien muestra cómo un orificio en la caja parece totalmente negro e indica falsamente que el interior es negro. 2 Los buzones cubiertos de nieve plantean una pregunta: ¿qué principio físico explica por qué los que tienen color claro están cubiertos de nieve, en tanto que los negros no tienen nieve? 3 Fotografías más recientes de Helen, quien muestra la misma caja... sí, con interior blanco.

Cuando Helen Yan era la alumna con mejores calificaciones de mi clase de física en 1984 y se convirtió en mi asistente en clase, medio en broma le sugerí que continuara con la física y se convirtiera en ingeniera aeroespacial. Tal vez me lo tomó en serio porque, después de terminar tanto una licenciatura como una maestría en física, en la actualidad *es* ingeniera aeroespacial. En aquel entonces posó para el par de fotografías identificadas con el número 1 en la página anterior, que aparecieron por primera vez en la quinta edición de *Física conceptual*, cuando todos los libros de física se imprimían sólo en tinta negra. Este libro no se imprimió en color hasta la séptima edición. Entonces Helen posó de nuevo para el mismo par de fotografías a todo color y dichas fotografías han aparecido en las ediciones desde entonces.

En las fotografías, Helen ilustra una propiedad de la radiación y en la actualidad, curiosamente, ella se especializa en la radiación de la parte infrarroja del espectro. Su carrera científica comenzó cuando vigilaba los detalles de los lanzamientos de cohetes con Lockheed Martin. Su participación ahí consistía en elaborar diseños de sensores de visualización que llevan los satélites para ver detalles de la superficie de la Tierra; un trabajo fascinante. Además, enseña física de tiempo parcial en el City College de San Francisco e imparte el mismo curso que tomó conmigo en aquellos años.

Helen es un símbolo de la excelencia personal en mi carrera como profesor, así como un modelo para otros. De modo que, cuando encuentres una brillante jovencita que no esté segura de un objetivo profesional, sugiérele seguir la trayectoria de Helen y, sí, ¡que incluso se convierta en ingeniera aeroespacial!

## 16.1 Conducción

La mayoría de las personas disfruta asar malvaviscos en una fogata. Si sostienes los malvaviscos con un tenedor metálico mientras esperas a que se tueste la superficie y quede crujiente, el tenedor puede calentarse tanto que ya no puedas sostenerlo. El calor entra en el extremo del tenedor que se mantiene en las flamas y se transmite a todo su largo hasta tu mano. Esta forma de transmisión de calor se llama **conducción**. El fuego hace que los átomos del extremo calentado del tenedor vibren con más rapidez. Dichos átomos vibran contra los átomos vecinos, los cuales, a su vez, hacen lo mismo. Lo más importante es que los electrones libres que pueden viajar por el metal se empujan y transfieren energía al chocar con los átomos y los otros electrones libres en el interior del material.

Qué tan bien un tenedor metálico o cualquier objeto sólido conduce calor depende del enlace dentro de su estructura atómica o molecular. Los sólidos compuestos de átomos que tienen uno o más electrones exteriores "sueltos" conducen bien el calor (y la electricidad). Los metales tienen los electrones exteriores "más sueltos", los cuales tienen libertad para transportar energía mediante colisiones por todo el metal. Es por esto que los metales son excelentes conductores del calor y la electricidad. La plata es el mejor conductor, seguido del cobre y el oro, y, entre los metales comunes, el aluminio, y el hierro muy detrás. La mayoría de los líquidos y gases son malos conductores. Los malos conductores que impiden la transferencia de calor se llaman *aislantes*. Madera, lana, paja, papel, corcho y espuma de estireno son buenos aislantes del calor. A diferencia de los electrones en los metales, los electrones exteriores en los átomos de estos aislantes están firmemente unidos.

Puesto que la madera es un buen aislante (mal conductor) del calor, ésta se usa en los mangos de los recipientes de cocina. Aun cuando esté caliente, puedes agarrar el mango de madera de una cazuela con la mano desnuda y retirar rápidamente la cazuela de la estufa caliente sin quemarte. Agarrar un mango de hierro a la misma temperatura seguramente te quemaría la mano. La madera es un buen aislante aun cuando esté muy caliente, es por eso que quienes caminan sobre fuego pueden andar descalzos sobre carbones al rojo vivo en un fuego de leña sin quemarse los pies. (*Precaución*: No intentes hacerlo por tu cuenta; incluso los caminadores en fuego experimentados en ocasiones reciben graves quemaduras cuando las condiciones no son las adecuadas: trozos de carbón pegados a los pies, por ejemplo.) El principal factor para caminar sobre fuego es la baja conductividad de la madera, incluso la madera al rojo vivo. Aunque su temperatura es alta, se transmite relativamente poco calor hacia los pies, así como poco calor se conduce por el aire cuando colocas la mano brevemente en un horno de pizza caliente. Si tocas el metal en el horno caliente, ¡Ay! De igual modo, un caminador de fuego que pisa un trozo de metal caliente

**pti**

- La transferencia espontánea de calor siempre va de los objetos más calientes a los objetos más fríos y se realiza de tres formas: por *conducción*, por *convección* y por *radiación*.

**FIGURA 16.1**
Cuando tocas un clavo clavado en hielo, ¿el frío fluye del clavo a tu mano, o la energía fluye de tu mano al clavo?

**VIDEO: El secreto para caminar sobre carbones calientes**

**VIDEO: El aire es un mal conductor**

La sensación de calor o frío con diferentes materiales tiene que ver con tasas de transferencia de calor, no necesariamente con temperaturas.

**FIGURA 16.2**
El piso de loseta se siente más frío que el piso de madera, aun cuando ambos materiales estén a la misma temperatura. Esto se debe a que el azulejo es un mejor conductor del calor que la madera y, por tanto, el calor se conduce más fácilmente fuera de los pies que tocan la loseta.

**SCREENCAST: Transferencia de calor**

**FIGURA 16.3**
Los patrones de nieve sobre el techo de una casa muestran áreas de conducción y aislamiento. Las partes desnudas muestran dónde el calor interior se ha fugado por el techo y fundido la nieve.

Los hornos de convección son simplemente hornos con un ventilador interior que acelera la cocción mediante la circulación del aire caliente.

u otro buen conductor se quemará. La evaporación de la humedad en los pies húmedos también puede ser importante al caminar en fuego, como verás en el siguiente capítulo.

El aire es muy mal conductor, por lo que tu mano, como ya se dijo, no se lastima si la colocas brevemente en un horno caliente. Las buenas propiedades aislantes de materiales como la madera, la piel y las plumas se deben principalmente a los espacios de aire que contienen. Otras sustancias porosas como la fibra de vidrio también son buenos aislantes debido a sus muchos pequeños espacios de aire. Debes agradecer que el aire sea un mal conductor; si no lo fuera, ¡sentirías mucho frío en un día a 20 °C (68 °F)!

La nieve es un mal conductor (un buen aislante), casi igual que la madera seca. Por tanto, una manta de nieve literalmente puede mantener el calor de la tierra en invierno. Los copos de nieve se forman con cristales, que se reúnen en masas plumosas que aprisionan el aire y, en consecuencia, impiden que el calor escape de la superficie de la Tierra. Las tradicionales viviendas invernales árticas están protegidas del frío por sus cubiertas de nieve. Los animales del bosque encuentran cobijo del frío en bancos de nieve y en huecos en la nieve. La nieve no proporciona calor; simplemente retrasa la pérdida del calor que generan los animales.

El calor se transmite de una temperatura más alta a una más baja. Con frecuencia se escucha a las personas decir que quieren que el frío no entre en sus casas. Una mejor forma de expresar esto es decir que quieren impedir que el calor escape. No hay "frío" que fluya al interior de una casa caliente (a menos que sobre ella sople viento frío). El frío es simplemente la ausencia de calor. Una casa se vuelve más fría porque el calor sale de ella. Las casas se aíslan con lana de roca para evitar la pérdida de calor y no para evitar la entrada de frío. Es importante señalar que ningún aislante puede impedir por completo la pérdida de calor. Un aislante simplemente reduce la tasa a la que el calor penetra. En invierno, incluso las casas calientes con mejor aislamiento gradualmente se enfriarán. El aislamiento retrasa la transferencia de calor.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **En regiones desérticas que son calurosas durante el día y frías en la noche, las paredes de las casas con frecuencia están hechas de lodo. ¿Por qué es importante que las paredes de lodo sean gruesas?**
2. **¿Por qué puedes colocar la mano brevemente en el interior de un horno caliente sin lastimarte, pero te quemas si tocas los lados metálicos del horno?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Una pared de grosor adecuado mantiene la casa caliente en la noche porque retrasa el flujo de calor del interior al exterior, y mantiene la casa fría durante el día porque retrasa el flujo de calor del exterior al interior. Tal pared tiene "inercia térmica".
2. Cuando colocas la mano en el aire del horno caliente, no te quemas principalmente porque el aire es un mal conductor: el calor no viaja bien entre el aire caliente y tu mano. Tocar los lados metálicos calientes del horno es otra historia, porque el metal es un excelente conductor y fluye mucho calor hacia tu mano.

## 16.2 Convección

Líquidos y gases transmiten calor principalmente mediante **convección**, que es la transferencia de calor por el movimiento real del propio fluido. A diferencia de la conducción (en la que el calor se transfiere mediante colisiones sucesivas de electrones y átomos), la convección involucra el movimiento de "masas" de materia: el movimiento de todas las moléculas de un fluido.

La convección puede ocurrir en todos los fluidos, ya sean líquidos o gases. Ya sea que calientes agua en una cacerola o aire en una habitación, el proceso es el mismo (Figura 16.4). A medida que el fluido se calienta desde abajo, las moléculas del fondo comienzan a moverse más rápido, se dispersan más, se vuelven menos densas y flotan hacia arriba (principio de Arquímedes). El fluido más denso y más frío se mueve para tomar el lugar del fluido más caliente en el fondo. De esta forma, las corrientes de convección mantienen el fluido agitado mientras se calienta: el fluido más caliente se aleja de la fuente de calor y el fluido más frío se mueve hacia la fuente de calor.

En la atmósfera hay corrientes de convección y afectan la temperatura del aire. Cuando una parcela de aire cerca del suelo se calienta, se expande, se vuelve menos densa y flota hacia arriba. El aire que sube se enfría luego, a medida que se expande aún más, y realiza trabajo sobre el aire a menor presión que encuentra a mayor altitud. De modo que la energía adquirida en un inicio por el fragmento de aire, tal vez de la radiación solar, es más que compensada por la energía que pierde al realizar trabajo mientras se expande en su camino de ascenso. El resultado: la temperatura del aire es menor a mayor altitud (excepto por los casos especiales llamados inversiones). (Realiza el siguiente experimento en este preciso momento. Con la boca abierta, sopla sobre tu mano. Tu aliento es caliente. Ahora repite, pero esta vez junta los labios para reducir la abertura, de modo que tu aliento se expanda a medida que sale de tu boca. ¡Observa que tu aliento es mucho más frío! El aire en expansión se enfría. Esto es lo opuesto de lo que ocurre cuando el aire se comprime. Si alguna vez has comprimido aire con una bomba para neumáticos, probablemente observaste que tanto el aire como la bomba se calentaron bastante.)

Para comprender el enfriamiento del aire en expansión piensa que las moléculas de aire son como pequeñas pelotas de ping-pong que rebotan unas contra otras. Una pelota adquiere rapidez cuando es golpeada por otra pelota que se aproxima con mayor rapidez. Pero cuando una pelota choca con otra que retrocede, su rapidez de rebote se reduce. Lo mismo sucede con una pelota de ping-pong que se mueve hacia una raqueta: adquiere rapidez cuando golpea una raqueta que se aproxima, pero pierde rapidez cuando golpea una raqueta que retrocede. La misma idea se aplica a una región de aire que se expande: las moléculas chocan, en promedio, con más moléculas que retroceden que con moléculas que se aproximan (Figura 16.6). Por eso, en el aire en expansión, la rapidez promedio de las moléculas disminuye a medida que el aire se enfría.[1]

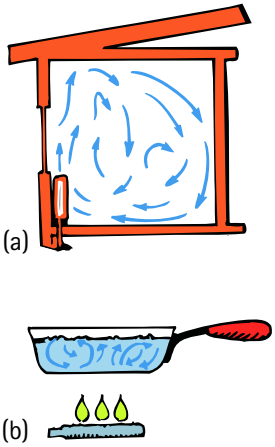



**FIGURA 16.4**
(a) Corrientes de convección en aire.
(b) Corrientes de convección en líquido.

**FIGURA 16.5**
Sopla aire caliente sobre tu mano con la boca abierta. Ahora reduce la abertura de tus labios de modo que el aire se expanda mientras soplas. ¿Observas alguna diferencia en la temperatura del aire?

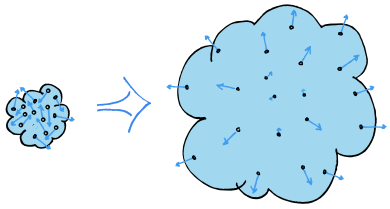


**FIGURA 16.6**
Las moléculas en una región de aire en expansión chocan con más frecuencia con moléculas que retroceden que con moléculas que se aproximan. Por tanto, sus rapideces de rebote tienden a disminuir y, como resultado, el aire en expansión se enfría.

[1]¿A dónde va la energía en este caso? En el Capítulo 18 verás que va al trabajo realizado sobre el aire circundante a medida que el aire en expansión empuja hacia afuera.

**FIGURA 16.7**
El vapor caliente se expande desde la olla de presión y es frío al tacto de Millie.

Un ejemplo sorprendente del enfriamiento por expansión ocurre con el vapor que se expande por la boquilla de una olla de presión (Figura 16.7). El efecto de enfriamiento tanto de la expansión como de la rápida mezcla con aire más frío te permite colocar la mano cómodamente en el chorro de vapor condensado. (*Precaución*: si intentas esto, asegúrate de colocar la mano suficientemente arriba sobre la boquilla y luego bajarla hasta una distancia cómoda. Si colocas la mano en la boquilla, donde no aparece vapor, ¡cuidado! El vapor es invisible cerca de la boquilla antes de haberse expandido y enfriado lo suficiente. La nube de "vapor" que ves en realidad es vapor de agua condensado, que es mucho más frío.)

Las corrientes de convección que agitan la atmósfera producen vientos. Algunas partes de la superficie de la Tierra absorben calor del Sol más fácilmente que otras y, como resultado, el aire cerca de la superficie se calienta de manera dispareja y se forman corrientes de convección. Esto es evidente en la playa. Durante el día, la playa se calienta más fácilmente que el agua. El aire sobre la playa es empujado hacia arriba (se dice que se eleva) por el aire más frío que proviene de arriba del agua y toma su lugar. El resultado es una brisa marina. Durante la noche, el proceso se invierte: la playa se enfría más rápidamente que el agua, y entonces el aire más caliente está sobre el mar (Figura 16.8). Si enciendes una fogata en la playa, notarás que el humo se dirige hacia tierra firme durante el día y hacia el mar en la noche.

La convección sucede siempre que los fluidos están sujetos a diferencias de temperatura. Produce nubes en el cielo y contribuye a las corrientes oceánicas en las aguas del mar profundo. En el interior de la Tierra, la convección del material semifundido es la causa probable del deslizamiento de las placas tectónicas, que provocan eventos como terremotos y erupciones volcánicas. La convección desempeña una función muy importante en el Sol. La convección es un actor central en mucho de lo que ocurre a tu alrededor.

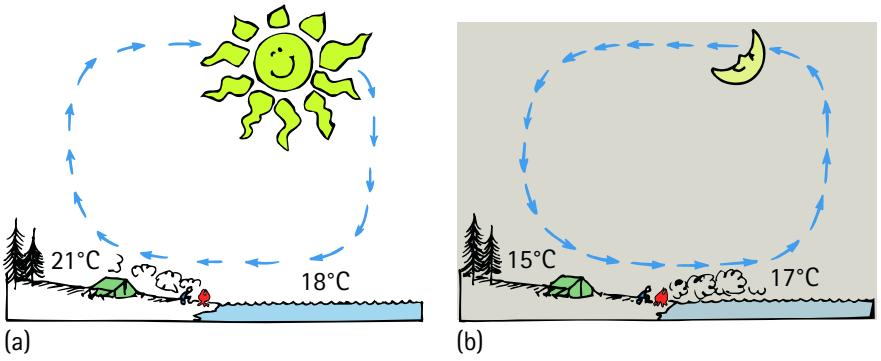



**FIGURA 16.8**
Corrientes de convección producidas por calentamiento desigual de tierra y agua. (a) Durante el día, el aire caliente que está sobre la tierra asciende y el aire más frío que está sobre el agua se mueve para sustituirlo. (b) Durante la noche, la dirección del flujo de aire se invierte porque entonces el agua es más caliente que la tierra.

**FIGURA 16.9**
Un calefactor en la punta de un tubo en forma de J sumergido en agua produce corrientes de convección, que se revelan como sombras (causadas por las desviaciones de la luz en el agua a diferentes temperaturas).

**PUNTO DE CONTROL**

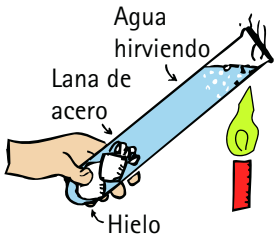
**Puedes colocar los dedos al lado de la llama de la vela sin quemarte, pero no arriba de la llama. ¿Por qué?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

El aire caliente viaja hacia arriba por convección del aire. Dado que el aire es un mal conductor, muy poco calor viaja hacia los lados, hacia tus dedos.

## PRACTICANDO LA FÍSICA

Sostén con la mano el fondo de un tubo de ensayo lleno de agua fría. Calienta la parte superior en una llama hasta que el agua hierva. El hecho de que todavía puedas sostener el fondo del tubo de ensayo demuestra que el vidrio y el agua son malos conductores de calor y que la convección no mueve el agua caliente hacia abajo. Esto es incluso más impresionante cuando calzas trozos de hielo en el fondo con un poco de lana de acero; entonces el agua que está encima puede hervir sin fundir el hielo. Inténtalo y observa.




## 16.3 Radiación

La energía del Sol pasa a través del espacio y luego a través de la atmósfera de la Tierra y calienta la superficie de la Tierra. Esta energía no pasa a través de la atmósfera por conducción, porque el aire es un mal conductor. Tampoco pasa por convección, porque la convección comienza sólo después de que la Tierra se calienta. También sabes que ni la convección ni la conducción son posibles en el espacio vacío entre la atmósfera y el Sol. Puedes ver que la energía debe transmitirse por algún otro medio: por **radiación**.[2] La energía así radiada se llama *energía radiante*.

**SCREENCAST: Energía radiante**

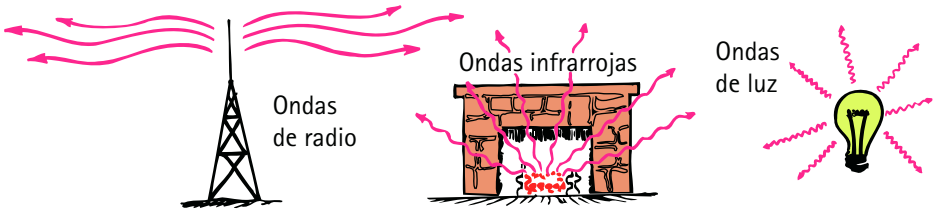



**FIGURA 16.10**
Tipos de energía radiante (ondas electromagnéticas).

La energía radiante está en forma de *ondas electromagnéticas*. Incluye ondas de radio, microondas, radiación infrarroja, luz visible, radiación ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Estos tipos de energía radiante se mencionan en orden de longitud de onda, de la más larga a la más corta. La radiación infrarroja (abajo del rojo) tiene longitudes de onda más largas que la luz visible. Las longitudes de onda visibles más largas son las de la luz roja, y las más cortas son las de la luz violeta. La radiación ultravioleta (más allá del violeta) tiene longitudes de onda más cortas. (La longitud de onda se aborda con más detalle en el Capítulo 19, y las ondas electromagnéticas se cubren con más detalle en los Capítulos 25 y 26.)

La longitud de onda de la radiación se relaciona con la *frecuencia* de la radiación. La frecuencia es la tasa de vibración de una onda. La niña de la Figura 16.11 sacude una cuerda a una frecuencia baja (arriba) y a una frecuencia más alta (abajo). Observa que la sacudida a baja frecuencia produce una onda floja larga, y la sacudida a frecuencia más alta produce ondas más cortas. Lo mismo sucede con las ondas electromagnéticas. En el Capítulo 26 verás que los electrones en vibración emiten ondas electromagnéticas. Las vibraciones de baja frecuencia producen ondas con longitud de onda larga y las vibraciones de alta frecuencia producen ondas cortas.

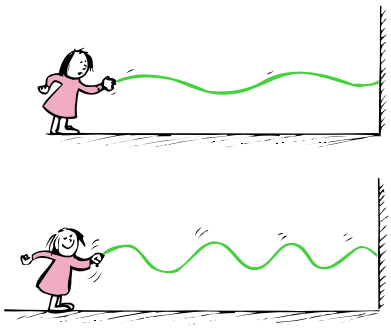


**FIGURA 16.11**
Cuando la cuerda se sacude lentamente (a baja frecuencia) se produce una onda con longitud de onda larga. Cuando se sacude más rápidamente (a una frecuencia alta), se produce una onda con longitud de onda más corta.

[2]La radiación de la que se habla aquí es radiación electromagnética, incluida la luz visible. No confundas esto con la radiactividad, un proceso del núcleo atómico que estudiarás en la Parte 7.

La radiación de la Tierra es *radiación terrestre*. La radiación del Sol es *radiación solar*. Ambas están en regiones dentro del espectro electromagnético. (¿Cómo llamarías a la radiación proveniente de esa persona especial para ti?)

## Emisión de energía radiante

Todas las sustancias a cualquier temperatura por arriba del cero absoluto emiten energía radiante. La frecuencia pico $\overline{f}$ de la energía radiante es directamente proporcional a la temperatura absoluta (Kelvin) $T$ del emisor (Figura 16.12):

$$\overline{f} \sim T$$

Si un objeto está suficientemente caliente, parte de la energía radiante que emite está en el rango de la luz visible. A una temperatura de aproximadamente 500°C, un objeto comienza a emitir la radiación con la longitud de onda más larga que puedes ver, la luz roja. A medida que su temperatura aumenta, se vuelve "rojo vivo", luego

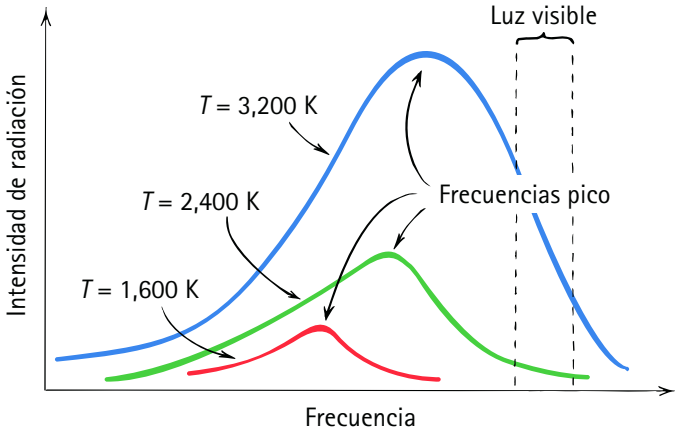



**FIGURA 16.12**
Curvas de radiación para diferentes temperaturas. La frecuencia pico de la energía radiante es directamente proporcional a la temperatura absoluta del emisor.

parece amarillenta y, a alrededor de los 5,000°C, donde emite luz fuertemente en todas las longitudes de onda visible, está al "rojo blanco". Una estrella azul es más caliente que una estrella blanca, la cual, a su vez, es más caliente que una estrella roja. Si una estrella azul particular emite luz del doble de la frecuencia pico de la luz de cierta estrella roja, la estrella azul tendría el doble de la temperatura superficial que la estrella roja.[3]

Puesto que la superficie del Sol tiene una temperatura alta (para los estándares terrestres), emite energía radiante de alta frecuencia, gran parte de ella en la región visible del *espectro electromagnético*. En comparación, la superficie de la Tierra es relativamente fría y, en consecuencia, la energía radiante que emite consiste en frecuencias más bajas que las de la luz visible. La radiación emitida por la Tierra está en forma de *ondas infrarrojas*, por debajo del umbral de visión humano. La energía radiante emitida por la Tierra se llama **radiación terrestre**.

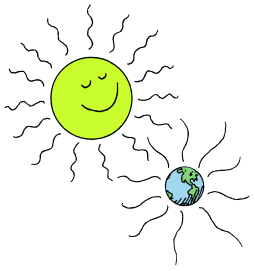


**FIGURA 16.13**
Tanto el Sol como la Tierra emiten el mismo tipo de energía radiante. El brillo del Sol es visible al ojo humano; el brillo de la Tierra consiste en longitudes de onda más largas y no son visibles al ojo humano.

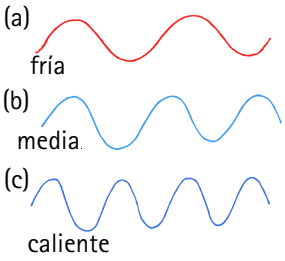



**FIGURA 16.14**
(a) Una fuente de baja temperatura (fría) emite principalmente ondas con longitud de onda larga y baja frecuencia.
(b) Una fuente de temperatura media emite principalmente ondas con longitud de onda media y frecuencia media.
(c) Una fuente de alta temperatura (caliente) emite principalmente ondas con longitud de onda corta y alta frecuencia.

La energía radiante del Sol surge de las reacciones nucleares en su interior profundo. Del mismo modo, las reacciones nucleares en el interior de la Tierra calientan el planeta (visita las profundidades de cualquier mina y descubrirás que ahí abajo hace calor... todo el año). Gran parte de esta energía interna se dirige hacia la superficie para convertirse en radiación terrestre.

Todos los objetos (tú, tu profesor y todo lo que te rodea) continuamente emiten energía radiante sobre un rango de frecuencias. Los objetos con temperaturas cotidianas emiten principalmente ondas de baja frecuencia que son invisibles al ojo humano, llamadas *infrarrojas*. Cuando tu piel absorbe ondas infrarrojas de frecuencia más alta, como cuando te paras al lado de una estufa caliente, tienes la sensación de calor. Así que es común referirse a la radiación infrarroja como *radiación térmica*. Las fuentes infrarrojas comunes que producen la sensación de calor son el Sol, el filamento de una lámpara y las ascuas ardientes de una fogata.

La radiación térmica es la base de los termómetros infrarrojos. Simplemente apuntas el termómetro hacia algo cuya temperatura quieres conocer, oprimes un botón y

[3]La *cantidad* de energía radiante $Q$ emitida por un objeto es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura Kelvin, $Q \sim T^4$.

aparece una lectura digital de temperatura. La radiación emitida por el objeto proporciona la lectura. Los termómetros infrarrojos didácticos comunes operan en el rango de alrededor de –30 a 200°C.

**FIGURA 16.15**
Un termómetro infrarrojo mide la energía radiante infrarroja emitida por un cuerpo y la convierte a temperatura.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Alguno de los siguientes *no* proporciona energía radiante? (a) El Sol, (b) lava de un volcán, (c) carbones al rojo vivo, (d) este libro que lees.**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Ojalá no hayas respondido (d), el libro. ¿Por qué? Porque el libro, como las otras sustancias mencionadas, tiene temperatura, aunque no tan alta. De acuerdo con la regla $\overline{f} \sim T$ éste, por tanto, emite radiación cuya frecuencia pico $\overline{f}$ es muy baja comparada con las frecuencias de radiación emitidas por las demás sustancias. Todo lo que tenga una temperatura por arriba del cero absoluto emite radiación electromagnética. Así es: ¡todo!

## Absorción de energía radiante

Si todo emite energía, ¿por qué al final no todo se queda sin energía? La respuesta es que todo también absorbe energía. Los buenos emisores de energía radiante también son buenos absorbentes; los malos emisores son malos absorbentes. Por ejemplo, una antena de radio construida para ser buen emisor de ondas de radio también es, por su mismo diseño, un buen receptor (absorbente) de ellas. Una antena transmisora con un mal diseño también es mala receptora.

La superficie de cualquier material, caliente o fría, absorbe y emite energía radiante. Si la superficie absorbe más energía de la que emite, es un absorbente neto y su temperatura aumenta. Si emite más de la que absorbe, es un emisor neto y su temperatura cae. El que una superficie desempeñe la función de emisor neto o de absorbente neto depende de si su temperatura está por arriba o por debajo de la de su entorno. Si la superficie es más caliente que sus alrededores, será un emisor neto y se enfriará. Si su superficie es más fría que sus alrededores, será un absorbente neto y se volverá más caliente. Toda superficie, caliente o fría, tanto absorbe como emite energía radiante.

Puedes verificar esto con un par de recipientes metálicos del mismo tamaño y forma, uno con una superficie blanca o especular y el otro con una superficie negra (Figura 16.17). Llena los recipientes con agua caliente y coloca un termómetro en cada uno. Descubrirás que el recipiente negro se enfría más rápido. La superficie negra es una mejor emisora. El café o el té permanecen calientes más tiempo en un recipiente brillante que en uno oscuro. El mismo experimento puede realizarse a la inversa. Esta vez, llena cada recipiente con agua helada y coloca los recipientes enfrente de una fogata, en el exterior durante un día caluroso o en cualquier lugar donde haya una buena fuente de energía radiante. Descubrirás que el recipiente negro se calienta más rápido. Como se dijo, un objeto que emite bien también absorbe bien.

**FIGURA 16.16**
La pizza que disfruta Dennis McNelis es un emisor neto. La misma pizza sería un absorbente neto si fuese más fría que sus alrededores. Si algo es un emisor neto o un absorbente neto depende de las temperaturas relativas.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Si un buen absorbente de energía radiante fuese un mal emisor, ¿cómo se compararía su temperatura con la temperatura de sus alrededores?**
2. **Un granjero enciende el quemador de propano en su granero una mañana fría y calienta el aire a 20°C (68°F). ¿Por qué todavía siente frío?**

**FIGURA 16.17**
Cuando los recipientes están llenos de agua caliente (o fría), el negro se enfría (o se calienta) más rápido.

La emisión y la absorción en la parte visible del espectro son afectadas por el color, en tanto que la parte infrarroja del espectro se afecta más por la textura de la superficie. Un acabado mate emite/absorbe mejor en el infrarrojo que uno pulido, cualquiera que sea el color.

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Si un buen absorbente no fuera también un buen emisor, habría una absorción neta de energía radiante y la temperatura del absorbente permanecería más alta que la temperatura del entorno. Las cosas que te rodean se aproximan a una temperatura común sólo porque los buenos absorbentes también son, por su misma naturaleza, buenos emisores.
2. Las paredes del granero todavía están frías. El granjero radia más energía hacia las paredes de la que las paredes radian de vuelta, y él siente frío. (Dentro de tu casa o salón de clase, estás cómodo sólo si las paredes están calientes, no sólo el aire.)

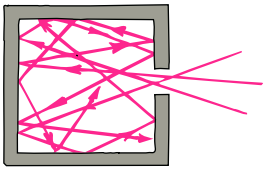


**FIGURA 16.18**
La radiación que entra en la cavidad tiene poca posibilidad de salir porque la mayor parte se absorbe. Por esta razón, la abertura de cualquier cavidad parece negra.

## Reflexión de energía radiante

Absorción y reflexión son procesos opuestos. Un buen absorbente de energía radiante refleja muy poca energía radiante, incluida la luz visible. Por tanto, una superficie que refleja muy poca o ninguna energía radiante parece oscura. De modo que un buen absorbente parece oscuro y un absorbente perfecto no refleja energía radiante y parece completamente negro. La pupila del ojo, por ejemplo, permite la entrada de luz casi sin reflexión, por lo que parece negra. (Una excepción ocurre en las fotografías con flash, cuando las pupilas parecen rojas. La luz muy brillante se refleja de la superficie interior roja del ojo y regresa a través de la pupila.)

Observa el extremo abierto de las tuberías en una pila; los agujeros parecen negros. Observa las puertas o ventanas abiertas de las casas distantes durante el día y, también, parecen negras. Las aberturas parecen negras porque la luz que entra en ellas se refleja de ida y vuelta en las paredes interiores muchas veces y se absorbe parcialmente en cada reflexión. Como resultado, queda muy poca luz para regresar por la abertura y viajar hacia tus ojos (Figura 16.18). Helen Yan ilustró esto muy bien en las fotografías del inicio del capítulo.

Los buenos reflectores, por otra parte, son malos absorbentes. La nieve limpia es un buen reflector y, por tanto, no se derrite rápidamente en la luz solar. Si la nieve está sucia, absorbe energía radiante del Sol y se funde más rápido. Rociar hollín negro desde un avión sobre las montañas cubiertas de nieve es una técnica que se usa a veces en el control de aluviones. En consecuencia, se logra la fusión controlada en momentos favorables, en lugar de un súbito desprendimiento de nieve fundida.

**FIGURA 16.19**
La mayor parte del calor proporcionado por un radiador calefactor se logra mediante convección, de modo que el color hace poca diferencia (un mejor nombre para este tipo de calefactor sería *convector*). Sin embargo, para una eficiencia óptima, un radiador pintado de plateado radiará menos, se volverá y permanecerá más caliente, y calentará mejor el aire. ¡Así que pinta tu radiador de plateado!

## Enfriamiento en la noche mediante radiación

Los cuerpos que radian más energía de la que reciben se vuelven más fríos. Esto sucede en la noche cuando no hay radiación solar. Un objeto que se deja en el exterior durante la noche radia energía hacia el espacio y, debido a que el espacio en sí es extremadamente frío, recibe muy poca energía a cambio. Por ende, cede más energía de la que recibe y se vuelve más frío. Pero si el objeto es un buen conductor de calor (como el metal, la piedra o el concreto), se conduce calor desde el suelo, lo que estabiliza un poco su temperatura. Por otra parte, los materiales como la madera, la paja y el vidrio son malos conductores y se conduce poco calor del suelo a su interior. Estos materiales aislantes son radiadores netos y se vuelven *más fríos que el aire*. Es común que se forme escarcha sobre estos tipos de materiales aun cuando la temperatura del aire no baje hasta la congelación. ¿Alguna vez has visto un prado o campo cubierto con escarcha en una mañana fría, pero por encima del punto de congelación, antes de salir el Sol? La próxima vez que veas esto, observa que la escarcha sólo se forma sobre el pasto, la paja u otros malos conductores, pero no se forma en el cemento, las piedras u otros buenos conductores.

Los jardineros serios cubrirán sus plantas con un toldo cuando esperen una helada. Las plantas radian justo como antes, pero ahora reciben energía radiante del toldo en lugar del oscuro cielo nocturno. Puesto que el toldo radia como un objeto a la temperatura del entorno en lugar de a la temperatura del frío cielo oscuro, no se forma escarcha en las hojas de las plantas. Ésta es la misma razón por la que las plantas en un porche cubierto no tendrán escarcha sobre ellas, en tanto que las plantas expuestas al cielo abierto sí la tendrán.

La Tierra misma intercambia radiación con sus alrededores. El Sol es una parte dominante de los alrededores de la Tierra durante el día. La mitad de la Tierra iluminada por el Sol absorbe más energía radiante que la que emite. En la noche, si el aire es relativamente transparente y no está cubierto de nubes, la Tierra radia más energía al espacio profundo de la que recibe a cambio. Como los investigadores de los Bell Laboratories, Arno Penzias y Robert Wilson, aprendieron en 1965, el espacio exterior tiene una temperatura: aproximadamente 2.7 K (2.7 grados arriba del cero absoluto). El espacio en sí emite una radiación débil característica de dicha temperatura baja.[4]

**FIGURA 16.20**
Los pedazos de cristales de escarcha revelan las entradas ocultas de las madrigueras de los ratones. ¡Cada grupo de cristales es el aliento congelado del ratón!

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Cuál es probablemente más fría: una noche cuando puedes ver las estrellas o una noche cuando no puedes verlas?**
2. **En invierno, ¿por qué, en la carretera, la superficie de un puente tiende a estar más helada que las superficies a ambos extremos del puente?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Es más fría la noche estrellada, cuando la superficie de la Tierra radia directamente hacia el gélido espacio profundo. En una noche nublada, la radiación neta es menor, porque las nubes radian energía de vuelta a la superficie de la Tierra.
2. La energía radiada por las carreteras sobre tierra firme se recarga parcialmente por el calor conducido desde el suelo más caliente bajo el pavimento. Pero no hay contacto térmico entre las superficies del camino de los puentes y el suelo, de modo que reciben muy poca, o ninguna, energía de reabastecimiento conducida desde el suelo. Es por esto que las superficies de las carreteras sobre los puentes se vuelven más frías que las carreteras en tierra, lo que aumenta la posibilidad de formación de hielo sobre los puentes. ¡Comprender la transferencia de calor puede hacer de ti un conductor más seguro!

**pti**

- En cualquier hora dada, más energía del Sol llega a la Tierra que toda la energía usada por todas las fuentes de toda la población humana en cualquier año dado.

## 16.4 Ley de Newton de enfriamiento

Por sí mismos, los objetos más calientes que sus alrededores a la larga se enfrían hasta coincidir con la temperatura circundante. La tasa de enfriamiento depende de cuánto más caliente sea el objeto que sus alrededores. Una tarta de manzana caliente se enfriará más cada minuto si se pone en un congelador frío que si se deja en la mesa de la cocina. Eso se debe a que, en el congelador, la diferencia de temperatura entre la tarta y sus alrededores es mayor. De igual modo, la tasa a la que una casa caliente vierte energía interna hacia los exteriores fríos depende de la diferencia entre las temperaturas interior y exterior.

**FIGURA 16.21**
El largo pie de la copa de vino ayuda a evitar que el calor de la mano caliente el vino.

[4]Penzias y Wilson compartieron un Premio Nobel por su descubrimiento de la "radiación de fondo cósmico", considerada una reliquia del Big Bang. Su temperatura ahora se ha medido hasta la increíble exactitud de 2.725 K, y está revelando mucho sobre la historia temprana del Universo y su composición actual.

Es interesante que la ley de Newton de enfriamiento sea una relación empírica y no una ley fundamental como las leyes de movimiento de Newton.

La tasa de enfriamiento de un objeto (ya sea por conducción, por convección o por radiación) es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperatura $\Delta T$ entre el objeto y sus alrededores.

$$\text{Tasa de enfriamiento} \sim \Delta T$$

Esto se conoce como **ley de Newton de enfriamiento**. (¿Adivina a quién se acredita el descubrimiento de esto?) La ley también se aplica al calentamiento. Si un objeto es más frío que sus alrededores, su tasa de calentamiento también es proporcional a $\Delta T$. La comida congelada se calentará más rápido en una habitación caliente que en una habitación fría.[5]

La tasa de enfriamiento que experimentas en un día frío puede aumentar con el efecto convectivo agregado del viento. De esto se habla en términos del *factor de enfriamiento del viento*. Por ejemplo, un factor de enfriamiento del viento de –20°C significa que se pierde calor a la misma tasa que si la temperatura fuera de –20°C sin viento.

**PUNTO DE CONTROL**

**Dado que una taza caliente de té pierde calor más rápidamente que una taza templada de té, ¿es correcto decir que una taza caliente de té se enfriará a temperatura ambiente antes que una taza templada de té?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

¡No! Aunque la tasa de enfriamiento sea mayor para la taza más caliente, tiene que enfriarse más para alcanzar equilibrio térmico. El tiempo extra es igual al tiempo que tarda en enfriarse hasta llegar a la temperatura inicial de la taza templada de té. La tasa de enfriamiento y el tiempo de enfriamiento no son la misma cosa.

## 16.5 El efecto invernadero

Una función muy importante del vidrio en el invernadero de un florista es evitar la convección del aire exterior más frío con el aire interior más caliente. De modo que el efecto invernadero en realidad es mucho más importante en el calentamiento global que en el calentamiento de los invernaderos de los floristas.

Un automóvil estacionado en la calle bajo el Sol brillante de un día caluroso con las ventanas cerradas puede volverse muy caliente en su interior, mucho más caliente que el aire exterior. Éste es un ejemplo del **efecto invernadero**, así llamado por el mismo efecto de aumento de la temperatura de los invernaderos de vidrio de los floristas. Para comprender el efecto invernadero es necesario entender dos conceptos.

El primer concepto ya se señaló: todas las cosas radian, y la frecuencia y longitud de onda de la radiación dependen de la temperatura del objeto que emite la radiación. Los objetos a alta temperatura radian longitudes de onda cortas; los objetos a baja temperatura radian longitudes de onda largas. El segundo concepto que necesitas conocer es que la transparencia de las cosas, como el aire y el vidrio, depende de la longitud de onda de la radiación. El aire es transparente tanto para las longitudes de onda infrarrojas (largas) como para las longitudes de onda visibles (cortas), a menos que el aire contenga vapor de agua y dióxido de carbono en exceso, en cuyo caso es opaco al infrarrojo. El vidrio es transparente a las longitudes de onda de la luz visible, pero es opaco a las longitudes de onda infrarrojas. (La física de la transparencia y la opacidad se estudia en el Capítulo 26.)

[5]Un objeto caliente que contenga una fuente de energía puede permanecer más caliente que sus alrededores de manera indefinida. La energía interna que emite no necesariamente lo enfría, y la ley de Newton de enfriamiento no se aplica. Por ende, el motor en operación de un automóvil permanece más caliente que el cuerpo del automóvil y el aire circundante. Pero, después de apagar el motor, se enfría en concordancia con la ley de Newton de enfriamiento y gradualmente se aproxima a la misma temperatura que sus alrededores. Del mismo modo, el Sol permanecerá más caliente que sus alrededores en tanto su horno nuclear funcione... otros 5 mil millones de años más o menos.

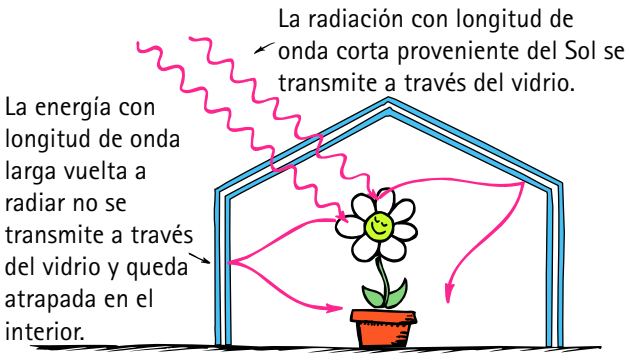



**FIGURA 16.22**
El vidrio es transparente a la radiación con longitud de onda corta, pero opaco a la radiación con longitud de onda larga. La energía vuelta a radiar por la planta tiene una longitud de onda larga, porque la planta tiene una temperatura relativamente baja.

Ahora, respecto de por qué el automóvil se vuelve tan caliente en la luz solar brillante: comparada con el automóvil, la temperatura del Sol es muy alta. Esto significa que las longitudes de onda radiadas por el Sol son muy cortas. Dichas longitudes de onda cortas pasan fácilmente a través tanto de la atmósfera de la Tierra como de las ventanas de vidrio del automóvil. De modo que la energía proveniente del Sol llega al interior del automóvil, donde, excepto por la reflexión, se absorbe. El interior del automóvil se calienta. El interior del automóvil radia sus propias longitudes de onda pero, dado que no es tan caliente como el Sol, las longitudes de onda son más largas. Las longitudes de onda largas vueltas a radiar encuentran vidrio que no es transparente para ellas. Así que la energía vuelta a radiar permanece en el automóvil, lo que calienta todavía más el interior del automóvil (por eso, dejar a tu mascota en el automóvil en un día soleado es un error rotundo).

El mismo efecto ocurre en la atmósfera de la Tierra, que es transparente a la radiación solar. La superficie de la Tierra absorbe esta energía y vuelve a radiar parte de ésta como radiación terrestre con longitud de onda más larga. Los gases atmosféricos (principalmente el vapor de agua y el dióxido de carbono) absorben y vuelven a emitir gran parte de esta radiación terrestre con longitud de onda larga de vuelta a la Tierra. La radiación terrestre que no puede escapar de la atmósfera de la Tierra impide que la Tierra se enfríe mucho. Este efecto invernadero es muy agradable, pues de otro modo la Tierra tendría unos gélidos −18°C. Durante los últimos 500,000 años la temperatura promedio de la Tierra ha fluctuado entre eras de hielo por abajo de cero y 15°C, y 15°C es el punto alto actual, y está en ascenso.

Aunque el $H_2O$ es el principal gas de efecto invernadero en la atmósfera, el segundo gas de efecto invernadero más abundante, el $CO_2$, es notorio porque los seres humanos lo aportan cada vez más. Por desgracia, mayor calentamiento por $CO_2$ puede disparar también más $H_2O$. De modo que la preocupación ambiental actual es la combinación de cantidades cada vez más altas de estas dos moléculas en la atmósfera, lo que aumentaría aún más la temperatura y produciría un nuevo equilibrio térmico desfavorable para la biosfera.

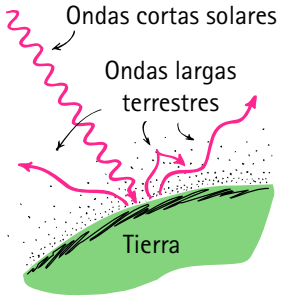



**FIGURA 16.23**
El Sol caliente emite longitudes de onda cortas y la Tierra fría emite longitudes de onda largas. El vapor de agua, el dióxido de carbono y otros "gases de efecto invernadero" en la atmósfera retienen el calor que de otro modo se radiaría de la Tierra hacia el espacio.

## 16.6 Cambio climático

Un principio importante es que "nunca puedes cambiar sólo una cosa". Cambia una cosa, y cambias otra. Una temperatura terrestre un poco más alta significa océanos un poco más calientes, lo que significa ascenso de los niveles del mar y cambios en los patrones climáticos y de las precipitaciones. El consenso entre los científicos es que el clima de la Tierra se ha calentado mucho muy rápido, y sigue haciéndolo. Este fenómeno se llama *calentamiento global* o su resultado: *cambio climático*.

El tiempo es el estado de la atmósfera en un momento y lugar particulares: su temperatura, humedad, presión, precipitación, viento y nubes. El clima es el patrón de tiempo sobre regiones más amplias y tiempos más prolongados. Un verano caliente o un solo huracán no son evidencia del calentamiento global o del cambio climático. El calentamiento global y el cambio climático son más que fluctuaciones del tiempo, que vienen y se van. El consenso científico es que el cambio climático está aquí.

Cómo evolucionará esto, no se sabe. En un extremo, pueden hacerse correcciones y la vida estará bien para los habitantes de la Tierra. En el otro extremo, se recuerda al planeta Venus, que en épocas anteriores pudo haber tenido un clima un poco similar al de la Tierra, hasta que un efecto invernadero galopante condujo a su atmósfera actual: 96% $CO_2$, con una temperatura superficial promedio de 460°C. Venus es el planeta más caliente del sistema solar. Y no hay duda de que no se quiere seguir su destino. Es probable que se necesite vigilancia, no sólo suerte, para que la Tierra siga siendo agradable y habitable durante los próximos siglos.

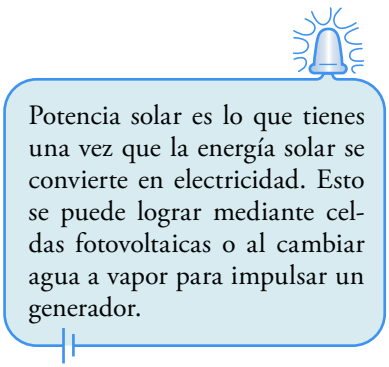
Algo que no se sabe es el efecto a largo plazo de los microbios y parásitos patógenos cuando sus hábitats naturales cambian en formas básicas. Tampoco se sabe la manera como la agricultura hará frente a los suelos secos cuando escasee el agua para riego. Lo que sí se sabe es que los modelos climáticos indican que los ecosistemas y los cultivos humanos de todo el mundo se perturbarán seriamente debido al derretimiento de glaciares, aumento del nivel del mar y eventos climáticos más extremos. También se sabe que el consumo de energía y los cambios en la atmósfera guardan relación con el tamaño de la población. Ya es tiempo de que la humanidad aborde el tema del crecimiento continuo. (Por favor: date tiempo para leer el Apéndice E, "Crecimiento exponencial y tiempo de duplicación"; un material muy importante.)

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Qué termina por suceder con la energía solar que cae sobre la Tierra?**
2. **¿Qué significa decir que el efecto invernadero es como una válvula de una vía?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Tarde o temprano, se radiará de vuelta al espacio. La energía siempre está en tránsito: puedes rentarla, pero no poseerla.
2. El material transparente, como lo es la atmósfera para la Tierra y el vidrio para el invernadero, sólo permite el ingreso de las longitudes de onda cortas y bloquea la salida de las longitudes de onda largas. Como resultado, la energía radiante queda atrapada en el interior del "invernadero".



Potencia solar es lo que tienes una vez que la energía solar se convierte en electricidad. Esto se puede lograr mediante celdas fotovoltaicas o al cambiar agua a vapor para impulsar un generador.

## 16.7 Energía solar

Si caminas de la sombra a la luz solar, eres calentado considerablemente. El calor que sientes no se debe tanto a que el Sol sea caliente, pues su temperatura superficial de 6,000°C no es más caliente que las flamas de algunos sopletes de soldadura. Te calientas principalmente porque el Sol es muy *grande*.[6] Como resultado, emite enormes cantidades de energía, de la cual menos de una parte en un billón llega a la Tierra. No obstante, la cantidad de energía radiante recibida a cada segundo sobre cada metro cuadrado en ángulo recto con respecto a los rayos del Sol en lo alto de la atmósfera es de 1,400 joules (1.4 kJ). Esta entrada de energía se llama **constante solar**. Esto es equivalente, en unidades de potencia, a 1.4 kilowatts por metro cuadrado (1.4 kW/m$^2$). La **potencia solar** es la tasa a la que la energía solar se recibe del Sol. La cantidad de potencia solar que llega al suelo es atenuada por la atmósfera y reducida por ángulos de elevación no perpendiculares del Sol. Además, desde luego, cesa durante la noche. La potencia solar recibida en Estados Unidos, promediada durante día y noche, verano e invierno, es de aproximadamente 13% la constante solar (0.18 kW/m$^2$). Esta cantidad de potencia, que ilumina el techo de un hogar estadounidense común, es el doble de la potencia necesaria para calentar y enfriar cómodamente la casa todo el año. Cada vez más hogares captan la energía solar para calentamiento de espacios y agua. También están ganando popularidad las tejas fotovoltaicas que se mezclan de manera casi impecable con los materiales de los techos.

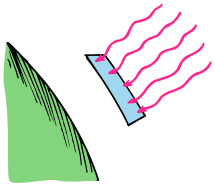


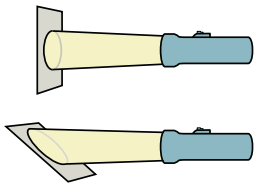
**FIGURA 16.24**
Sobre cada metro cuadrado de área perpendicular a los rayos del Sol en lo alto de la atmósfera, el Sol vierte 1,400 J de energía radiante a cada segundo. Por tanto, la constante solar es 1.4 kJ/s/m$^2$ o 1.4 kW/m$^2$.

[6]Para visualizar cuán grande es el Sol, date cuenta de que su diámetro es más de tres veces la distancia entre la Tierra y la Luna. De modo que, si la Tierra y la Luna estuvieran dentro del Sol, con la Tierra en el centro solar, la Luna estaría muy profundo en el interior. ¡El Sol es *realmente* grande!

## PRACTICANDO LA FÍSICA

¿La distancia al Sol, o el ángulo de los rayos del Sol sobre la Tierra, explican las regiones polares gélidas y las regiones ecuatoriales tropicales? Puedes ver la respuesta por ti mismo si sostienes una linterna sobre una superficie y observas su brillantez. Cuando la luz golpea perpendicularmente, la energía luminosa se concentra, pero cuando la superficie se inclina, manteniendo la misma distancia, la luz incidente se dispersa más. ¿Puedes ver que la misma energía sobre un área más grande es semejante a las bajas temperaturas de las regiones ártica y antártica de la Tierra?

El dibujo a la derecha es de la Tierra con rayos de luz paralelos provenientes del Sol. Cuenta el número de rayos que golpean la región A y la región B de igual área. ¿Dónde es menor la energía por unidad de área? ¿Cómo se relaciona esto con el clima?



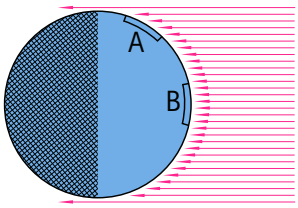



**FIGURA 16.25**
Los calentadores solares de alta tecnología están cubiertos con vidrio para proporcionar un efecto invernadero, lo que calienta aún más el agua.

La portada de este libro muestra sistemas fotovoltaicos que convierten luz solar directamente en electricidad. Las celdas fotovoltaicas pueden diseñarse para necesidades de potencia que van desde miliwatts hasta megawatts, y alimentar una calculadora o un generador en una planta eléctrica. También pueden ubicarse en áreas remotas que no son fácilmente accesibles a las líneas de la red eléctrica. Los sistemas de recolección y concentración de energía solar, ya sean arreglos de espejos o celdas fotovoltaicas, están compitiendo en costo con la energía eléctrica generada por las fuentes de energía convencionales.

**FIGURA 16.26**
Un uso sencillo y efectivo de la energía solar.

## 16.8 Cómo controlar la transferencia de calor

Una manera agradable de repasar los métodos de transferencia de calor es pensar en un dispositivo que inhibe los tres métodos: el termo. Un termo (conocido por su nombre comercial Thermos) consiste en un recipiente de vidrio con doble pared, con un vacío entre las paredes y una tapa hermética de corcho o plástico. (Por lo general también hay una cubierta exterior.) Las superficies de vidrio que están una frente a la otra son plateadas. Cualquier líquido, caliente o frío, en un termo permanecerá cerca de su temperatura original durante muchas horas.

1. La transferencia de calor por *conducción* a través del vacío es imposible. Un poco de calor escapa por conducción a través del vidrio y la tapa, pero éste es un proceso lento, porque el vidrio, el plástico y el corcho son malos conductores.
2. El vacío no tiene fluido para convección, así que no hay pérdida de calor a través de las paredes por *convección*.
3. La pérdida de calor por *radiación* se reduce con las superficies plateadas de las paredes, que reflejan las longitudes de onda térmicas de vuelta a la botella.

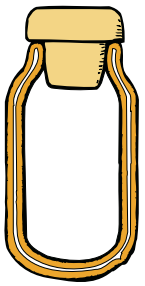


**FIGURA 16.27**
Una botella Thermos.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Conducción.** La transferencia de energía térmica mediante colisiones moleculares y de electrones dentro de una sustancia (especialmente un sólido).

**Convección.** La transferencia de energía térmica en un gas o en un líquido mediante corrientes en el fluido calentado. El fluido se mueve y transporta energía consigo.

**Radiación.** La transferencia de energía mediante ondas electromagnéticas.

**Radiación terrestre.** La radiación emitida por la Tierra hacia el espacio exterior.

**Ley de Newton de enfriamiento.** La tasa de pérdida de calor de un objeto caliente es proporcional a la diferencia de temperatura entre el objeto y sus alrededores. (Lo mismo sucede con la ganancia de calor por parte de un objeto frío.)

**Efecto invernadero.** Calentamiento de la atmósfera inferior mediante la radiación con longitud de onda corta proveniente del Sol que penetra la atmósfera, es absorbida por la Tierra y se vuelve a radiar con longitudes de onda más largas que no pueden escapar con facilidad de la atmósfera de la Tierra.

**Constante solar.** 1,400 $J/m^2$ recibidos del Sol a cada segundo en lo alto de la atmósfera de la Tierra sobre un área perpendicular a los rayos del Sol; se expresa en términos de potencia, 1.4 $kW/m^2$.

**Potencia solar.** Energía por unidad de tiempo recibida del Sol.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 16.1 Conducción

1. ¿Cuál es la función de los electrones "libres" en los conductores de calor?
2. Si tocas los lados metálicos de un horno con la mano desnuda, estarás en problemas. Pero mantén la mano brevemente en el aire del horno y estarás bien. ¿Qué te dice esto acerca de las conductividades relativas del metal y el aire?
3. Explica por qué alguien que camina sobre fuego puede andar rápidamente sin lastimarse sobre carbones al rojo vivo con los pies descalzos.
4. ¿Por qué los materiales como la madera, la piel, las plumas e incluso la nieve son buenos aislantes?
5. ¿Un buen aislante impide que escape el calor o retrasa su paso?

### 16.2 Convección

6. ¿Qué ocurre con el volumen del aire a medida que asciende? ¿Qué ocurre con su temperatura?
7. Cuando una molécula de aire es golpeada por una molécula que se aproxima más rápidamente, ¿su rapidez de rebote aumenta o disminuye? ¿Y qué ocurre cuando golpea una molécula en retroceso?
8. ¿Cómo se afectan las rapideces de las moléculas de aire cuando el aire se comprime por la acción de una bomba para neumáticos?
9. ¿Cómo se afectan las rapideces de las moléculas de aire cuando se separan entre sí cuando escapan de la boquilla de un globo?
10. ¿Por qué la mano de Millie no se quema cuando la sostiene arriba de la válvula de escape de la olla de presión (Figura 16.7)?
11. ¿Por qué la dirección de los vientos costeros cambia del día a la noche?

### 16.3 Radiación

12. ¿En qué forma viaja la energía radiante?
13. Hablando relativamente, ¿las ondas de alta frecuencia tienen longitudes de onda largas o cortas?
14. ¿Cómo se relaciona la frecuencia pico de la energía radiante con la temperatura absoluta de la fuente de radiación?
15. ¿Qué es radiación terrestre?
16. Cita una diferencia principal entre las ondas de la radiación solar y las ondas de la radiación terrestre.
17. Dado que todos los objetos emiten energía a sus alrededores, ¿por qué las temperaturas de todos los objetos no disminuyen de manera continua?
18. ¿Qué determina si un objeto es un absorbente neto o un emisor neto de energía radiante en un momento dado?
19. ¿Cuál por lo general se calienta más rápido: una cazuela negra con agua fría o una cazuela plateada con agua fría? ¿Cuál se enfriará más rápido?
20. ¿Un objeto puede ser tanto un buen absorbente como un buen reflector al mismo tiempo? ¿Por qué sí o por qué no?
21. ¿Por qué la pupila del ojo parece negra?
22. ¿Qué ocurre con la temperatura de algo que radia energía sin absorber la misma cantidad a cambio?
23. Un objeto que radia energía durante la noche está en contacto con la Tierra relativamente caliente. ¿Cómo su mala conductividad afecta la temperatura del objeto en relación con la temperatura del aire?

### 16.4 Ley de Newton de enfriamiento

24. ¿Cuál experimentará mayor tasa de enfriamiento: un atizador al rojo vivo en un horno caliente o un atizador al rojo vivo en una habitación fría (o ambos se enfrían a la misma tasa)?
25. ¿La ley de enfriamiento de Newton se aplica tanto al calentamiento como al enfriamiento?

### 16.5 El efecto invernadero

26. ¿Cuál sería la consecuencia de eliminar por completo el efecto invernadero?
27. ¿En qué forma el vidrio actúa como una válvula de una vía para un invernadero convencional? ¿La atmósfera actúa de igual modo como una válvula de una vía?

### 16.6 Cambio climático

28. Distingue entre tiempo y clima.

### 16.7 Energía solar

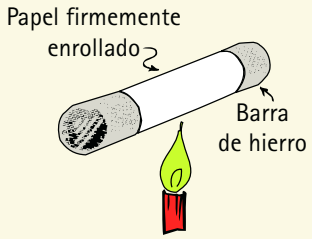
29. ¿Cuánta energía radiante proveniente del Sol, en promedio, llega a cada metro cuadrado en lo alto de la atmósfera de la Tierra cada segundo?

### 16.8 Cómo controlar la transferencia de calor

30. Cita tres formas en las que una botella Thermos inhibe la transferencia de calor.

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

31. Enrolla una hoja de papel en una gruesa barra de metal y colócala en una flama. Observa que el papel no se enciende. ¿Puedes explicar esto en términos de la conductividad de la barra metálica? (Por lo general, el papel no se encenderá hasta que su temperatura alcance aproximadamente 230°C.)




32. Enciende y apaga rápidamente una lámpara incandescente común mientras colocas la mano a pocos centímetros de la bombilla. Sientes su calor pero, cuando tocas la bombilla, no está caliente. Explica esto en términos de energía radiante y de la transparencia de la bombilla.
33. Escribe una carta a la abuela y comparte con ella tu conocimiento acerca de por qué la temperatura del aire es más fría en las noches claras y más cálida en las noches nubosas. Con ejemplos razonados, convéncela de que todas las cosas emiten continuamente energía, y absorben energía.

## SUSTITUYE Y LISTO (FAMILIARIZACIÓN CON ECUACIONES)

***Cantidad de calor: $Q = cm\Delta T$***

34. Demuestra que, para aumentar la temperatura de 50 g de agua de 0 a 100°C, se necesitan 5,000 cal. La capacidad calorífica específica del agua es 1 cal/g·°C.
35. Calcula la cantidad de calor absorbida por 20 g de agua que se calientan de 30 a 90°C.

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

36. El decaimiento radiactivo del granito y otras rocas en el interior de la Tierra proporciona suficiente energía para mantener el interior fundido, para calentar lava y para proporcionar calor a las fuentes termales naturales. Esto se debe a la liberación promedio de aproximadamente 0.03 J por kilogramo cada año. Demuestra que un aumento de 500°C en la temperatura para un trozo de granito térmicamente aislado tarda alrededor de 13.3 millones de años. (Supón que la capacidad calorífica específica $c$ del granito es 800 J/kg·°C. Usa la ecuación $Q = cm\Delta T$.)
37. En una habitación a 25°C, el café en un termo se enfría de 75 a 50°C en 8 horas. Explica por qué tu predicción es que su temperatura después de otras 8 horas será 37.5 °C.
38. En cierta ubicación, la potencia solar por unidad de área que llega a la superficie de la Tierra es 200 W/m$^2$, promediada sobre un día de 24 horas. Si en tu casa se necesita una potencia promedio de 3 kW y puedes convertir potencia solar en energía eléctrica con 10% de eficiencia, ¿cuán grande será el área del colector que necesitarás para satisfacer todas las necesidades de energía de tu casa con energía solar? (¿Un colector cabrá en tu patio o en tu techo?)
39. En el laboratorio sumerges 100 g de clavos de hierro a 40°C en 100 g de agua a 20°C (el calor específico del hierro es 0.11 cal/g·°C). a) Iguala el calor ganado por el agua con el calor perdido por los clavos y demuestra que la temperatura final del agua es de 22°C. b) Tu compañero de laboratorio se sorprende con el resultado y dice que, dado que las masas del hierro y el agua son iguales, la temperatura final del agua debe estar cerca de 30°C, a la mitad entre ellos. ¿Cuál es tu explicación?

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

40. En un día frío, ¿por qué el pomo metálico de una puerta se siente más frío que la puerta de madera?
41. ¿Cuál es la explicación de que las camas de plumas sean calientes?
42. Enrolla un abrigo de piel alrededor de un termómetro. ¿Subirá su temperatura?
43. Si el aire a 70°F se siente cálido y confortable, ¿por qué nadar en agua a 70°F se siente frío?
44. ¿A qué temperatura común un bloque de madera y un bloque de metal se sentirán ambos ni calientes ni fríos al tacto?
45. Si sostienes un extremo de un trozo de metal contra un trozo de hielo, el extremo en tu mano pronto se enfría. ¿El frío fluye del hielo a tu mano? Explica.
46. La madera es un mejor aislante que el vidrio, aunque la fibra de vidrio se usa comúnmente como aislante en los edificios de madera. Explica.
47. Mucha gente se ha lastimado la lengua por lamer un trozo de metal en un día muy frío. ¿Por qué no te lastimarías si en el mismo día lames un trozo limpio de madera?
48. Visita un cementerio cubierto de nieve y observa que la nieve no se acumula contra las lápidas. Más bien, forma depresiones, como se muestra. ¿Puedes pensar en una razón para esto?

49. ¿Por qué los mitones son más calientes que los guantes en un día frío?
50. La madera conduce muy mal el calor: tiene una conductividad muy baja. ¿La madera todavía tiene conductividad baja si está caliente? ¿Podrías agarrar rápidamente y con seguridad el mango de madera de una cazuela en un horno caliente con la mano desnuda? Aunque el mango de la cazuela esté caliente, ¿se conduce mucho calor de él hacia tu

mano si lo sujetas brevemente? ¿Por qué sería mala idea hacer lo mismo con un mango de hierro? Explica.

51. ¿La madera tiene una baja conductividad si está muy caliente; esto es: en la etapa de carbones ardientes al rojo vivo? ¿Podrías caminar con seguridad por un lecho de carbones de madera al rojo vivo con los pies descalzos? Aunque los carbones estén calientes, ¿se conduce mucho calor de ellos hacia tus pies si caminas rápidamente? ¿Podrías hacer lo mismo sobre carbones de hierro al rojo vivo? Explica. (*Precaución*: Los carbones pueden pegarse a tus pies, así que, ¡Ay!, ¡no lo intentes!)
52. ¿Es posible que el calor fluya entre dos objetos con la misma energía interna? ¿El calor puede fluir de un objeto con menos energía interna hacia uno con más energía interna? Defiende tu respuesta.
53. Cuando dos tazas de chocolate caliente, una a 50°C y la otra a 60°C, se vierten en un tazón, ¿por qué la temperatura de la mezcla estará entre 50°C y 60°C?
54 ¿Por qué es incorrecto decir que, cuando un objeto caliente calienta un objeto frío, la temperatura fluye entre ellos?
55. ¿Por qué es incorrecto decir que, cuando un objeto caliente calienta un objeto frío, el aumento de temperatura del objeto frío es igual a la disminución de temperatura del objeto caliente? ¿Cuándo es correcto este enunciado?
56. En una mezcla de gases hidrógeno y oxígeno a la misma temperatura, ¿cuáles moléculas se mueven más rápido? ¿Por qué?
57. Un recipiente está lleno de gas argón y el otro de gas kriptón. Si ambos gases tienen la misma temperatura, ¿en cuál recipiente los átomos se mueven más rápido? ¿Por qué?
58. ¿Cuáles átomos, en promedio, se mueven más lento en una mezcla, U-238 o U-235? ¿Cómo afectaría esto la difusión a través de una membrana porosa de gases, por lo demás idénticos, hechos de estos isótopos?
59. El uranio sólido puede convertirse químicamente en fluoruro de uranio, $UF_6$, que puede producir un vapor denso que se difunde a través de una barrera porosa. ¿Cuál es probable que se difunda a una mayor tasa, un gas con isótopo U-235 o U-238?
60. Piensa en dos habitaciones de igual tamaño conectadas por una puerta abierta. Una habitación se mantiene a una temperatura más alta que la otra. ¿Cuál habitación contiene más moléculas de aire?
61. En una habitación apacible, el humo de una vela en ocasiones se elevará sólo un poco, sin llegar al techo. Explica por qué.
62. Los cubos de hielo flotan en un vaso de té helado. ¿Por qué el enfriamiento sería menor si los cubos estuvieran en el fondo de la bebida?
63. Suelta una sola molécula en una región al vacío y caerá con la misma rapidez, y no de manera diferente, que caería una pelota de béisbol soltada en la misma región. Explica.
64. Por lo general, la densidad del aire es menor arriba de cualquier punto en el aire que abajo, lo que proporciona una "ventana de migración" en al aire. ¿Cómo afecta esto el movimiento de las moléculas de rápido movimiento en el aire?
65. ¿Qué tiene que ver el alto calor específico del agua con las corrientes de convección en el aire en la costa?
66. Si calientas un volumen de aire, éste se expande. ¿Entonces, si expandes un volumen de aire, éste se calienta? Explica.
67. Los ventiladores de techo pueden hacerte sentir más frío en una habitación caliente. ¿Los ventiladores de techo reducen la temperatura de la habitación?
68. Para ahorrar energía, algunos ventiladores de techo son reversibles, de modo que dirigen el aire hacia abajo o lo suben. ¿En qué dirección el ventilador debe llevar el aire durante el invierno? ¿En qué dirección durante el verano?
69. Una máquina de hacer nieve usada para las áreas de esquí sopla una mezcla de aire comprimido y agua por una boquilla. La temperatura de la mezcla inicialmente puede estar muy por arriba de la temperatura de congelación del agua, aunque se forman cristales de nieve a medida que la mezcla se expulsa por la boquilla. Explica cómo ocurre esto.
70. ¿En cuál forma de transferencia de calor no se necesita un medio?
71. ¿Por qué un buen *emisor* de radiación térmica parece negro a temperatura ambiente?
72. Dado que todos los objetos radian energía, ¿por qué no puedes verlos en la oscuridad?
73. Algunos cuerpos a diferentes temperaturas colocados en una habitación cerrada comparten energía radiante y a final de cuentas alcanzan una temperatura común. ¿Este equilibrio térmico sería posible si los buenos absorbentes fueran malos emisores y los malos absorbentes fueran buenos emisores? Explica.
74. De acuerdo con las reglas de que un buen absorbente de radiación es un buen radiador y un buen reflector es un mal absorbente, enuncia una regla que relacione las propiedades de reflexión y de radiación de una superficie.
75. El calor de los volcanes y las fuentes termales naturales proviene de pequeñas cantidades de minerales radiactivos en la roca común del interior de la Tierra. ¿Por qué el mismo tipo de roca en la superficie de la Tierra no es caliente al tacto?
76. Aun cuando el metal es un buen conductor, puede verse escarcha en los automóviles aparcados temprano en la mañana, inclusive cuando la temperatura del aire esté por arriba de la congelación. Proporciona una explicación.
77. Cuando hay escarcha matutina en el pasto de un parque, ¿por qué es poco probable encontrar escarcha en el suelo directamente debajo de las bancas del parque?
78. ¿Por qué en ocasiones al vidrio de los invernaderos de los floristas le ponen lechada de cal en el verano?
79. En un día soleado muy frío, vistes un abrigo negro y un abrigo de plástico transparente. ¿Cuál abrigo debes ponerte al último para un calentamiento máximo?
80. Si la composición de la atmósfera superior cambiara de modo que permitiera el escape de una mayor cantidad de radiación terrestre, ¿qué efecto tendría esto sobre el clima de la Tierra?
81. ¿Por qué el aislamiento en un ático por lo general es más grueso que el aislamiento en las paredes de una casa?
82. Elabora una pregunta de opción múltiple que compruebe que tus compañeros de clase comprendieron la diferencia entre conducción y convección. Escribe otra pregunta en la que el término *radiación* sea la respuesta correcta.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

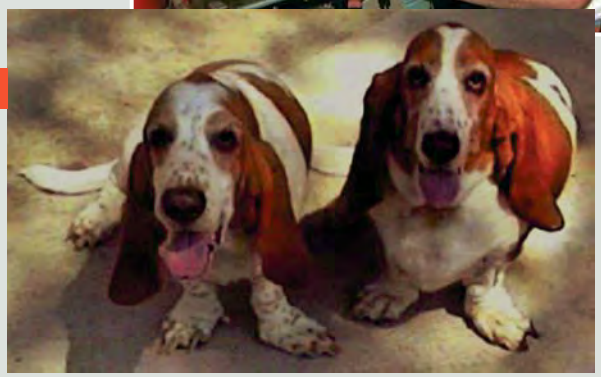
83. Discute el propósito de una capa de cobre o aluminio en el fondo de los artículos de cocina de acero inoxidable.
84. Discute en términos físicos por qué los restaurantes sirven las papas al horno envueltas en papel aluminio.
85. Si te quedaras atrapado en un clima congelante sólo con el calor de tu cuerpo como fuente, discute si estarías más caliente en un iglú ártico o en una choza de madera.
86. Un amigo dice que las moléculas en una mezcla de gas en equilibrio térmico tienen la misma energía cinética promedio. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo? Explica.
87. Tu amigo afirma que la rapidez promedio de todas las moléculas de hidrógeno y nitrógeno en un gas es la misma. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo, y por qué?
88. ¿Por qué no puedes esperar a que todas las moléculas de aire de tu habitación tengan la misma rapidez promedio? Relaciona tu discusión con masa y energía cinética.
89. Las aves que ascienden y los pilotos de planeadores pueden permanecer a flote durante horas sin gastar potencia. Discute por qué esto es así.
90. ¿Por qué el helio liberado en la atmósfera termina por desaparecer en el espacio?
91. ¿Es importante convertir temperaturas a la escala Kelvin cuando se usa la ley de Newton de enfriamiento? Discute por qué sí o por qué no.
92. Supón que, en un restaurante, te sirven café antes de que estés listo para beberlo. Con la finalidad de que esté más caliente cuando lo vayas a tomar, ¿debes agregar crema al café justo ahora o esperar hasta que estés listo para beberlo?
93. Si quieres ahorrar combustible y vas a salir de tu casa caliente durante media hora aproximadamente en un día muy frío, ¿debes bajar el termostato algunos grados, apagarlo por completo o dejarlo que permanezca a la temperatura ambiente que deseas?
94. Si quieres ahorrar combustible y vas a salir de tu casa fría durante media hora aproximadamente en un día muy caliente, ¿debes subir el termostato de tu acondicionador de aire un poco, apagarlo por completo o dejarlo que permanezca a la temperatura ambiente que deseas?
95. A medida que más energía de combustibles fósiles y otros combustibles se libera en la Tierra, la temperatura global del planeta tiende a aumentar. Analiza cómo el equilibrio de la temperatura explica por qué la temperatura de la Tierra no puede subir indefinidamente.
96. Discute la función de una celda fotovoltaica. ¿Qué produce a partir de qué?
97. Discute por qué un orificio de 1 $ft^2$ en el techo, que admite luz solar cuando el Sol está justo arriba, es como tener una bombilla de 100 W en la habitación. Supón que la atmósfera reduce la energía solar en la superficie de la Tierra como 1.0 $kW/m^2$.
98. Discute qué se entiende con el dicho “nunca puedes cambiar sólo una cosa”. Usa una ecuación matemática para reforzar tu argumentación.
99. ¿En qué forma la era industrial contribuyó al cambio climático? Discute mejores usos de los combustibles fósiles que la creación de calor y humo.
100. Discute la relación entre el crecimiento de la población humana y el cambio climático.

17

CAPÍTULO 17

# Cambio de fase


17.1 Fases de la materia
17.2 Evaporación
17.3 Condensación
17.4 Ebullición
17.5 Fusión y congelación
17.6 Energía y cambios de fase



1 Mi sobrino John Suchocki camina descalzo sin lastimarse sobre carbones calientes (¡con pasos rápidos!). 2 Dean Baird demuestra el rehielo, que se ilustra más adelante en la Figura 17.16. 3 Ron Hipschman en el Exploratorium retira un pedazo de hielo de la exposición del Congelador de Agua. Cuando se colocó agua a temperatura ambiente en la cámara y se formó un vacío, la rápida evaporación enfrío el agua y la volvió hielo, como se investigará en la Figura 17.14. 4 A falta de glándulas sudoríparas, los perros de Tammy jadean para enfriarse, acción en la que ocurre una evaporación tanto en la boca como en los bronquios.

A Dean Baird le fascina enseñar física, y se nota. Estableció y mantiene un programa de física con gran matrícula en la Rio Americano High School en Sacramento, California. Sus alumnos disfrutan los laboratorios y simulaciones manuales y los auxiliados por computadora, las demostraciones en las que participan y las animadas discusiones en clase. Siempre están a la espera del YouTube Physics de Baird. Si bien sus clases consisten en lanzar y atrapar huevos crudos, compartir un choque eléctrico, desacreditar a los caminadores en fuego y criticar las caricaturas del Correcaminos, sus estudiantes dominan la física tan bien que obtienen los niveles más altos en las evaluaciones estatales y en el examen de física AP. En su evento anual "ExploratoRio" (museo científico manual miniatura), Dean es el anfitrión de cientos de estudiantes locales de educación básica, ¡muchos de los cuales toman su clase unos ocho años después!

Dean ha asesorado a profesores de física de la localidad, presentado talleres para profesores a nivel estatal y nacional, escrito artículos para *The Physics Teacher* y creado los manuales de laboratorio para todos los libros de texto Hewitt. Fue nominado al California Department of Education's Assessment Review Panel. Un vistazo a su sitio web, www.phyz.org, indica cuán ocupado puede estar un profesor, pero aun así se da tiempo para viajar y tomar fotografías con calidad profesional (algunas de las cuales adornan estas páginas). Dean ha sido reconocido en los niveles local, estatal y nacional por su trabajo, y fue honrado por Barack Obama con un premio presidencial por excelencia en la enseñanza de las matemáticas y la ciencia. Dean tiene una pasión por hacer que los estudiantes se involucren en la física de distintas maneras, y siempre alienta el escepticismo y el pensamiento crítico.

A Dean le encanta la física térmica. Juega con calor y frío con un entusiasmo tal, que sus alumnos lo adoran por eso. No puede hacer bolas de nieve en Sacramento, pero en el laboratorio puede demostrar el rehielo, como se muestra en la segunda fotografía al comienzo del capítulo. Muestra cómo el alambre metálico pasa en forma lenta a través del bloque de hielo y lo recongela a medida que avanza, de modo que el hielo permanece intacto. En este capítulo se abordan las fases de la materia y los cambios de energía que ocurren siempre que se presenta un cambio de fase.

## 17.1 Fases de la materia

La materia a tu alrededor existe en cuatro *fases* (o *estados*) comunes. El hielo, por ejemplo, es la fase *sólida* del $H_2O$. Agrega energía y añades movimiento a la estructura molecular rígida, que se rompe para formar $H_2O$ en la fase *líquida*, agua. Agrega más energía y el líquido cambia a la fase *gaseosa*. Agrega todavía más energía y las moléculas se descomponen en iones y electrones, lo que genera la fase *plasma*. La fase de la materia depende de su temperatura y de la presión que se ejerce sobre ella. Los cambios de fase casi siempre necesitan una transferencia de energía.

Cuando el agua se convierte en gas, éste se llama vapor de agua.

## 17.2 Evaporación

El agua en una cacerola abierta con el tiempo se evaporará, o secará. El líquido que desaparece se convierte en vapor de agua en el aire. La **evaporación** es el cambio de fase de líquido a gas que ocurre en la superficie de un líquido.

La temperatura de cualquier sustancia se relaciona con la energía cinética promedio de sus partículas. Las moléculas del agua líquida tienen una gran variedad de rapideces, se mueven en todas direcciones y rebotan unas contra otras. En cualquier momento, algunas se mueven a muy altas rapideces en tanto que otras apenas se mueven. En el siguiente momento, las moléculas más lentas pueden volverse las más rápidas debido a colisiones moleculares. Algunas ganan energía cinética en tanto que otras la pierden. Las moléculas de la superficie que ganan energía cinética mediante choques desde abajo pueden tener suficiente energía para liberarse del líquido. Pueden abandonar la superficie y escapar al espacio que está arriba del líquido. De esta forma, se convierten en moléculas de vapor.

La mayor energía cinética de las moléculas que rebotan tan fuerte que se liberan del líquido proviene de las moléculas que permanecen en el líquido. Ésta es la "física de

Casi 90% de la humedad atmosférica de la Tierra proviene de la evaporación de sus océanos, lagos y ríos. El resto proviene de la transpiración de las plantas.

**FIGURA 17.1**
Cuando está húmeda, la cubierta de tela a los lados de la cantimplora favorece el enfriamiento.

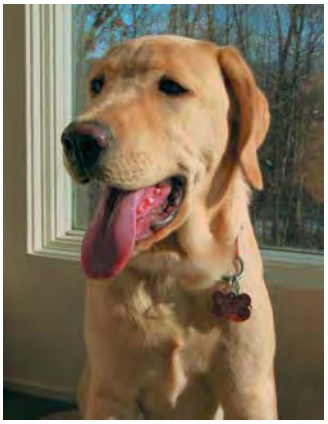


**FIGURA 17.2**
Como tiene glándulas sudoríparas sólo entre sus dedos, Sam jadea para enfriarse.

**FIGURA 17.3**
Los cerdos, que no tienen glándulas sudoríparas, se revuelcan en el lodo para enfriarse.

Por la sublimación, los cubos de hielo que se dejan en un congelador durante mucho tiempo se vuelven más pequeños.

las bolas de billar": cuando las bolas rebotan unas con otras y algunas ganan energía cinética, otras pierden la misma cantidad de energía cinética. Las moléculas a punto de ser impulsadas fuera del líquido son las que ganan, en tanto que las que pierden energía permanecen en el líquido. Por tanto, la energía cinética promedio de las moléculas que permanecen en el líquido se reduce: la evaporación es un proceso de enfriamiento. Es interesante que las moléculas rápidas que se liberan de la superficie sean frenadas a medida que se alejan debido a su atracción hacia la superficie. De modo que, si bien el agua se enfría por la evaporación, el aire de arriba no se calienta de forma correspondiente con el proceso.

La cantimplora de la Figura 17.1 se mantiene fría debido a la evaporación que tiene lugar cuando la tela que cubre los lados se mantiene húmeda. A medida que las moléculas de agua de movimiento más rápido se liberan de la tela, la temperatura de la tela disminuye. La tela húmeda fría, a su vez, enfría la cantimplora metálica mediante conducción, lo que, a su vez, enfría el agua que está dentro. De modo que la energía se transfiere del agua que está dentro de la cantimplora al aire exterior. De esta forma, el agua se enfría muy por debajo de la temperatura del aire exterior.

El efecto de enfriamiento de la evaporación es sorprendentemente evidente cuando aplicas un poco de alcohol a tu cuerpo. El alcohol se evapora muy rápidamente, lo que enfría la superficie del cuerpo con rapidez. Cuanto más rápida sea la evaporación, más rápido será el enfriamiento.

Cuando tu cuerpo se calienta en exceso, las glándulas sudoríparas producen transpiración. Esto es parte del termostato de la naturaleza, pues la evaporación de la transpiración enfría y ayuda a mantener una temperatura corporal estable. Muchos animales tienen muy pocas glándulas sudoríparas o ninguna en absoluto y deben enfriarse por otros medios (Figuras 17.2 y 17.3).

La tasa de evaporación es mayor a temperaturas más altas porque hay mayor proporción de moléculas que tienen energía cinética suficiente para escapar del líquido. El agua también se evapora a temperaturas más bajas, pero a una tasa más baja. Un charco de agua, por ejemplo, puede evaporarse con lentitud hasta quedar seco en un día frío.

Incluso el agua congelada se "evapora". Esta forma de evaporación, en la que las moléculas rebotan directamente de un sólido (hielo o nieve) a una fase gaseosa sin pasar por la fase líquida, se llama **sublimación**. Puesto que las moléculas de agua están tan firmemente sostenidas en la fase sólida, el agua congelada no se evapora (sublima) de manera tan fácil como el agua líquida. Sin embargo, la sublimación explica la pérdida de porciones significativas de nieve y hielo, y es especialmente alta los días soleados en climas secos.

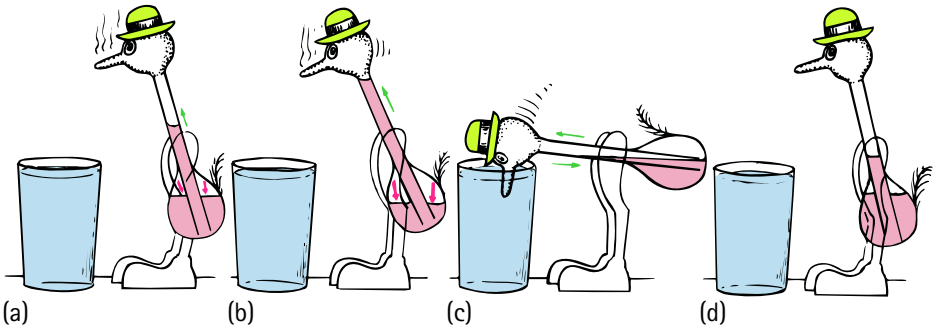



**FIGURA 17.4**
El pájaro bebedor de juguete funciona mediante la evaporación de un solvente (cloruro de metileno) en el interior de su cuerpo y por la evaporación de agua de la superficie exterior de su cabeza. La parte inferior del cuerpo contiene el solvente líquido, que se evapora con rapidez a temperatura ambiente. A medida que (a) se evapora, (b) aumenta la presión (flechas interiores), lo que empuja el solvente hacia arriba del tubo. El solvente de la parte superior no se evapora porque la cabeza se enfría mediante la evaporación del agua del pico y la cabeza cubiertos por fuera con fieltro. Cuando el peso del solvente de la cabeza es suficiente, el pájaro (c) gira hacia adelante, lo que permite al solvente fluir de vuelta al cuerpo. En cada giro humedece la superficie de fieltro del pico y la cabeza, y (d) el ciclo se repite.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿La evaporación sería un proceso de enfriamiento si las moléculas de cada rapidez tuvieran igual posibilidad de escapar de la superficie del líquido?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

No. Si las moléculas de todas las rapideces escaparan con igual facilidad de la superficie, las moléculas que quedaran atrás tendrían el mismo intervalo de rapideces que antes de que alguna escapara, y no habría un cambio en la temperatura del líquido. Cuando sólo las moléculas más rápidas pueden escapar, las que permanecen son más lentas y el líquido se enfría más.

**SCREENCAST: Evaporación y condensación**

**SCREENCAST: Lata que implota y pájaro bebedor**

## 17.3 Condensación

Lo opuesto a la evaporación es la **condensación**: el cambio de gas a líquido. Cuando las moléculas de gas cerca de la superficie de un líquido son atraídas hacia el líquido, golpean la superficie con creciente energía cinética y se vuelven parte del líquido. En las colisiones con moléculas de baja energía en el líquido, el exceso de energía cinética se comparte con el líquido, lo que aumenta la temperatura del líquido. La condensación es un proceso de calentamiento.

Un ejemplo sorprendente del calentamiento que ocasiona la condensación es la energía liberada por el vapor cuando se condensa: una experiencia dolorosa si se condensa sobre ti. Es por eso que una quemadura con vapor es mucho más dañina que una quemadura con agua hirviendo a la misma temperatura; el vapor libera mucha energía cuando se condensa a líquido y moja la piel. Esta liberación de energía por condensación se utiliza en los sistemas de calefacción por vapor.

El vapor es vapor de agua a alta temperatura, por lo general a 100°C o más. El vapor de agua más frío también libera energía cuando se condensa. Cuando tomas una ducha, por ejemplo, te calientas por la condensación del vapor en el espacio de la ducha —incluso el vapor de una ducha fría—, si permaneces en el área húmeda de la ducha. De inmediato sientes la diferencia cuando sales de ella. Lejos de la humedad, la evaporación neta tiene lugar rápidamente y sientes frío. Pero si permaneces en el espacio de la ducha, incluso con el agua cerrada, el efecto de calentamiento de la condensación contrarresta el efecto de enfriamiento de la evaporación. Si se condensa tanta humedad como la que se evapora, no sientes cambio en la temperatura corporal. Si la condensación supera la evaporación, te calientas. Si la evaporación supera la condensación, te enfrías. Así que ahora sabes por qué puedes secarte con una toalla mucho más cómodamente si permaneces en el espacio de la ducha. Para secarte por completo, puedes terminar la tarea en un área menos húmeda.

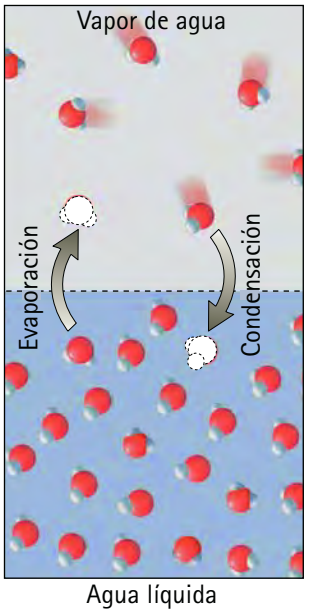



**FIGURA 17.5**
Intercambio de moléculas en la interfaz entre el agua líquida y gaseosa.

Pasa una tarde de julio en los secos Tucson o Phoenix, donde la evaporación es mucho mayor que la condensación. El resultado de esta evaporación pronunciada es una sensación mucho más fría de la que experimentarías en una tarde de julio, a la misma temperatura, en la ciudad de Nueva York o en Nueva Orleans. En estas ubicaciones húmedas, la condensación contrarresta de manera considerable la evaporación y sientes el efecto de calentamiento a medida que el vapor en el aire se condensa en tu piel. Literalmente eres bombardeado por el impacto de las moléculas de $H_2O$ en el aire que te golpean. Dicho más suavemente: te calientas por la condensación del vapor en el aire sobre tu piel.

**FIGURA 17.6**
El vapor libera energía interna cuando se condensa dentro del "radiador".

**FIGURA 17.7**
Si sientes frío fuera del espacio de la ducha, regresa a su interior y te calentarás por la condensación del exceso de vapor de agua.

**VIDEO: La condensación es un proceso de calentamiento**

**PUNTO DE CONTROL**

**Si el nivel del agua en un plato de agua no cambia de un día al siguiente, ¿puedes concluir que no ocurrió evaporación ni condensación?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

No del todo, pues a nivel molecular está teniendo lugar mucha actividad. Evaporación y condensación ocurren de manera continua. Que el nivel del agua sea constante simplemente indica proporciones iguales de ambas, no que nada ocurrió. Cuando se evapora el mismo número de moléculas que se condensan, no ocurre evaporación ni condensación neta. Los dos procesos se cancelan entre sí.

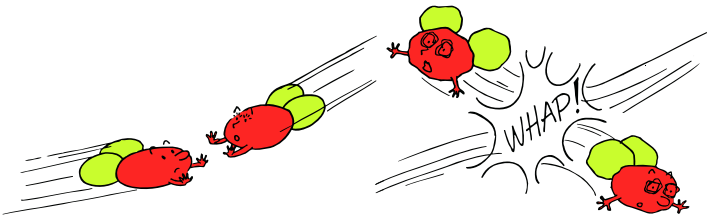
## Condensación en la atmósfera

Siempre hay un poco de vapor de agua en el aire. Una medida de la cantidad de este vapor de agua es la *humedad* (masa de agua por volumen de aire). En los informes del clima con frecuencia se utiliza el término *humedad relativa*: la razón entre la cantidad de vapor de agua que hay actualmente en el aire a una temperatura dada y la cantidad máxima de vapor de agua que puede contener el aire a dicha temperatura.[1]

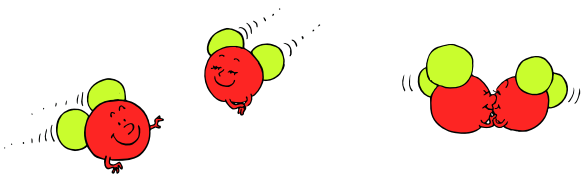
El aire que contiene tanto vapor como pueda está saturado. La saturación sucede cuando la temperatura del aire baja y las moléculas de vapor de agua en el aire comienzan a condensarse. Las moléculas de agua tienden a pegarse. Sin embargo, debido a sus rapideces promedio usualmente altas en el aire, casi ninguna molécula de agua se queda unida cuando chocan. Más bien, estas moléculas de movimiento rápido rebotan de vuelta cuando chocan y, por tanto, permanecen en la fase gaseosa. Sin embargo, algunas moléculas de agua se mueven más lentamente que el promedio, y esas moléculas lentas tienen más probabilidad de quedar pegadas unas con otras en una colisión (Figura 17.8). (Para entender esto, piensa en una mosca que roza un papel matamoscas pegajoso. A alta rapidez, la mosca tiene suficiente cantidad de movimiento y energía para rebotar del papel matamoscas hacia el aire sin quedar pegada, pero a baja rapidez es más probable que quede pegada.) De modo que las moléculas de agua con movimiento lento son las que tienen más probabilidad de condensarse y formar gotas de agua en el aire saturado. Puesto que las temperaturas del aire más bajas se caracterizan por moléculas con un movimiento más lento, es más probable que ocurran saturación y condensación en aire frío que en aire caliente. Es posible que el aire caliente contenga más vapor de agua que el aire frío.

**pti**

- ¿La humedad te hace sentir más calor, más frío, o ambos? Si ya tienes frío, más humedad te hace sentir más frío. Si ya tienes calor, más humedad te hace sentir más calor. A temperaturas agradables, un poco de humedad te hace sentir más cómodo.




Las moléculas de $H_2O$ con movimiento rápido rebotan en la colisión



Las moléculas de $H_2O$ con movimiento lento se unen en la colisión

**FIGURA 17.8**
Condensación del vapor de agua.

[1]La humedad relativa es un buen indicador de comodidad. Para la mayoría de las personas, las condiciones son ideales cuando la temperatura es de aproximadamente 20°C y la humedad relativa está entre 50 y 60%. Cuando la humedad relativa es mayor, el aire húmedo se siente "bochornoso" pues la condensación contrarresta la evaporación de la transpiración.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Por qué se forma rocío sobre una lata de gaseosa fría?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

El vapor de agua en el aire caliente se enfría cuando hace contacto con la lata fría. ¿Cuál es el destino de las moléculas de agua enfriadas? Son más lentas cuando chocan y se quedan pegadas. Esto es condensación, que es la razón por la que la superficie de una lata fría está húmeda.

## La niebla y las nubes

El aire caliente sube. A medida que sube, se expande. A medida que se expande, se enfría. A medida que el aire se enfría, las moléculas de vapor de agua, que son muy pequeñas para ser visibles, se frenan. Las colisiones moleculares a menor rapidez resultan en moléculas de agua que se quedan pegadas. Las moléculas de agua se combinan con pequeñas partículas de polvo, sal y humo en el aire para formar gotas de nube que crecen y se convierten en nubes. Si dichas partículas no están presentes, es posible estimular la formación de nubes si se "siembran" en el aire las partículas o los iones adecuados.

Las brisas calientes soplan sobre el océano y se convierten en humedad. Cuando el aire húmedo se mueve de aguas más cálidas a más frías o de agua caliente a tierra fría, se enfría. A medida que se enfría, las moléculas de vapor de agua comienzan a unirse en lugar de rebotar unas con otras. La condensación sucede cerca del nivel del suelo y se tiene niebla. La diferencia entre la niebla y una nube es básicamente la altitud. La niebla es una nube que se forma cerca del suelo. Volar a través de una nube es muy parecido a conducir a través de niebla. Consulta en internet para aprender acerca de los diferentes tipos de niebla.

Por lo general, las nubes son más densas que el aire. Así que, ¿por qué las nubes no caen del cielo? La respuesta es: ¡las nubes *sí* caen! Una nube estable cae tan rápido como se mueve el flujo de aire ascendente que está debajo de ella, de modo que permanece estacionaria. Si la nube cae de todas maneras, se le llama niebla.

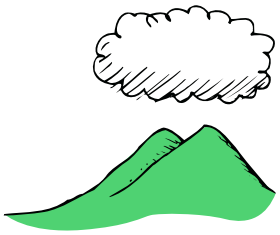


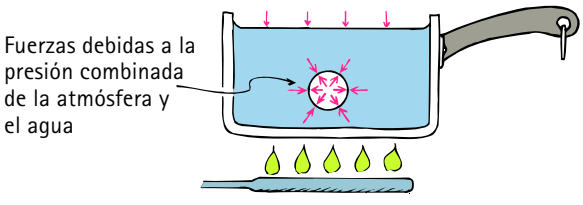
**FIGURA 17.9**
¿Por qué es común que las nubes se formen donde hay corrientes ascendentes de aire húmedo caliente?

## 17.4 Ebullición

En las condiciones correctas, la evaporación puede tener lugar por debajo de la superficie de un líquido, lo que forma burbujas de vapor que flotan hacia la superficie, donde escapan. Este cambio de fase *a través* de un líquido en lugar de sólo en la superficie se llama **ebullición**. Las burbujas en el líquido pueden formarse sólo cuando la presión del vapor en el interior de las burbujas es tan grande que resiste la presión del líquido circundante. Si la presión del vapor no es lo suficientemente grande, la presión circundante colapsará cualquier burbuja que tienda a formarse. A temperaturas por debajo del punto de ebullición, la presión del vapor en las burbujas no es tan grande, de modo que no se formarán burbujas sino hasta que se alcance el punto de ebullición. A esta temperatura (100°C para el agua a presión atmosférica) las moléculas son suficientemente energéticas para ejercer una presión de vapor tan grande como la presión del agua circundante (que se debe sobre todo a presión atmosférica).

Es común decir que se hierve el agua, dando a entender con esto que se le aplica calor. En realidad, el proceso de ebullición enfría el agua.

**FIGURA 17.10**
El movimiento de las moléculas de vapor de agua en la burbuja de vapor (muy agrandada) crea una presión de gas (llamada *presión de vapor*) que contrarresta la presión atmosférica y la del agua contra la burbuja.



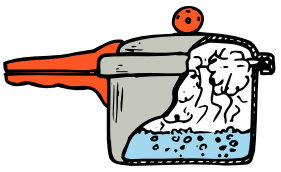



**FIGURA 17.11**
La tapa hermética de una olla de presión mantiene el vapor de agua presurizado arriba de la superficie del agua, lo que inhibe la ebullición. Por tanto, el agua hierve a una temperatura mayor que 100°C.

Si la presión aumenta, las moléculas del vapor deben moverse más rápido para ejercer suficiente presión y evitar que la burbuja colapse. Es posible proporcionar presión adicional ya sea al ir más profundo bajo la superficie del líquido (como en los géiseres) o al aumentar la presión del aire sobre la superficie del líquido, que es como funciona una olla de presión. Ésta tiene una tapa de ajuste hermético que no permite el escape del vapor

En la cima de montañas con una altitud de 4,500 m (15,000 pies), ¡un montañista puede dar un sorbo a una taza de té hirviendo sin peligro alguno de quemarse la boca!

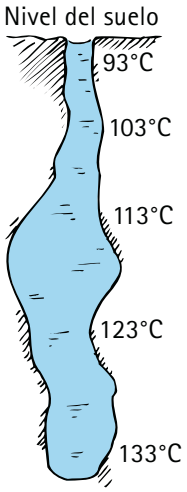



**FIGURA 17.12**
Un géiser del tipo Viejo Fiel.

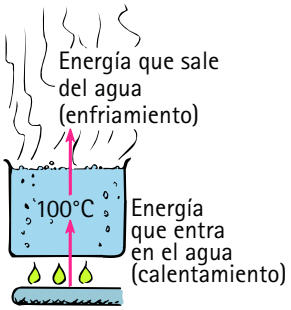



**FIGURA 17.13**
El calentamiento sube la temperatura del agua y la ebullición la enfría.

**VIDEO: La ebullición es un proceso de enfriamiento**

Los montañistas pioneros del siglo XIX, sin altímetros, usaban el punto de ebullición del agua para determinar sus altitudes.

hasta que alcanza cierta presión mayor que la presión normal del aire. A medida que se acumula vapor de evaporación en el interior de la olla de presión sellada, la presión sobre la superficie del líquido aumenta, lo que al principio impide la ebullición. Las burbujas que en condiciones normales se formarían son destrozadas. El calentamiento continuo aumenta la temperatura por encima de 100°C. No hay ebullición sino hasta que la presión de vapor en el interior de las burbujas supera la presión aumentada sobre el agua. El punto de ebullición se eleva. Por el contrario, la presión reducida (como a grandes altitudes) disminuye el punto de ebullición del líquido. De este modo, se observa que la ebullición depende no sólo de la temperatura, sino también de la presión.

A grandes altitudes, el agua hierve a una temperatura más baja. Por ejemplo, en Denver, Colorado, la ciudad que tiene el apodo de *Mile-High City* (ciudad de una milla de altura), el agua hierve a 95°C en lugar de a la temperatura de ebullición de 100°C característica del nivel del mar. Si intentas cocinar comida en agua hirviendo de una temperatura más baja, debes esperar más tiempo para la cocción adecuada. Un huevo hervido de 3 minutos en Denver es asqueroso. Si la temperatura del agua en ebullición es muy baja, la comida no se cocerá en absoluto. Es importante señalar que es la alta temperatura del agua la que cuece los alimentos, no el proceso de ebullición en sí.

## Géiseres

Un géiser es una olla de presión natural que hace erupción de manera periódica. Consiste en un largo y estrecho agujero vertical en el que se filtran corrientes subterráneas (Figura 17.12). La columna de agua se calienta por el calor volcánico inferior a temperaturas que superan los 100°C. Esto puede ocurrir porque la columna vertical relativamente profunda del agua ejerce presión sobre el agua más profunda, lo que aumenta el punto de ebullición. La estrechez del tiro evita corrientes de convección, lo que permite que las porciones más profundas se calienten mucho más que la superficie del agua. El agua en la superficie está a menos de 100°C, pero la temperatura del agua de abajo, donde se calienta, está a más de 100°C, suficientemente alta para permitir la ebullición antes de que el agua en la parte superior alcance el punto de ebullición. Por tanto, la ebullición comienza cerca del fondo, donde las burbujas ascendentes empujan hacia arriba la columna de agua sobre ellas, y comienza la erupción. A medida que el agua sale a borbotones, la presión sobre el agua restante se reduce. Entonces hierve con rapidez y hace erupción con gran fuerza. Cuando la erupción termina, la fisura se llena con agua nueva y el ciclo se repite.

## La ebullición es un proceso de enfriamiento

La evaporación es un proceso de enfriamiento. También lo es la ebullición. A primera vista, esto puede parecer sorprendente, tal vez porque suele asociarse la ebullición con el calentamiento. Pero una cosa es calentar agua y otra es la ebullición. Cuando hierve agua a 100°C a presión atmosférica, su temperatura permanece constante. Esto significa que se enfría tan rápido como se calienta. ¿Mediante qué mecanismo? Mediante la ebullición. Si el enfriamiento no tuviera lugar, la entrada continua de energía en una cacerola con agua hirviendo ocasionaría un aumento continuo de temperatura. Como se dijo, la razón por la que una olla de presión alcanza temperaturas más altas es porque evita la ebullición normal, lo que, en efecto, evita el enfriamiento.

**PUNTO DE CONTROL**

**Dado que la ebullición es un proceso de enfriamiento, ¿sería buena idea que metieras tus manos calurosas y sudorosas en agua en ebullición para enfriarlas?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

¡No, no, no! Cuando se dice que la ebullición es un proceso de enfriamiento, se entiende que el agua (¡no tus manos!) es la que se enfría en relación con la temperatura más alta que alcanzaría de otro modo. Debido al enfriamiento, permanece a 100°C en lugar de calentarse más. ¡Un chapuzón en agua a 100°C te haría gritar un enorme ay!

## Ebullición y congelación al mismo tiempo

Por lo general, el agua hierve por la aplicación de calor. Pero también se puede hervir agua mediante la reducción de presión. Se puede demostrar de manera sorprendente el efecto de enfriamiento de la evaporación y la ebullición si se coloca agua a temperatura ambiente en un frasco al vacío (Figura 17.14). Si la presión dentro del frasco se reduce en forma lenta con una bomba de vacío, el agua comenzará a hervir. El proceso de ebullición elimina calor del agua que queda en el plato, que se enfría hasta una temperatura más baja. A medida que la presión se reduce aún más, más y más moléculas tienen rapidez suficiente para convertirse en vapor. La ebullición continua resulta en una reducción de temperatura hasta que se alcanza el punto de congelación de aproximadamente 0°C. El enfriamiento continuo mediante ebullición produce la formación de hielo sobre la superficie del agua que burbujea. ¡Ebullición y congelación tienen lugar al mismo tiempo! Hay que verlo para poder apreciarlo. Las burbujas congeladas de agua en ebullición son un espectáculo extraordinario.[2]

Si rocías unas gotas de café en una cámara de vacío, también hervirán hasta la congelación. Incluso después de congeladas, las moléculas de agua continuarán evaporándose en el vacío hasta que queden pequeños cristales de café sólidos. Así es como se hace el café soluble (liofilizado). La baja temperatura de este proceso tiende a evitar el cambio en la estructura química de los sólidos de café. Cuando se agrega agua caliente, se restaura gran parte del sabor original del café. ¡La ebullición es en realidad un proceso de enfriamiento!

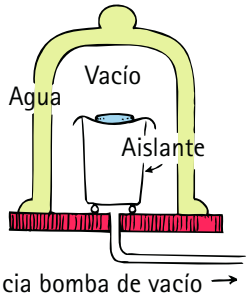



**FIGURA 17.14**
Aparato que demuestra que el agua se congela y hierve al mismo tiempo en un vacío. Un gramo o dos de agua se coloca en un plato que se aísla de la base mediante una taza de espuma de estireno.

# 17.5 Fusión y congelación

Supón que sostienes las manos de alguien y ambos comienzan a saltar al azar. Cuanto más violento salten, más difícil será mantener unidas las manos. Si saltaran con suficiente violencia, mantener unidas las manos sería imposible. Algo así le sucede a las moléculas de un sólido cuando se calienta. A medida que se absorbe calor, las moléculas vibran cada vez con más violencia en forma menos ordenada. Si se absorbe suficiente calor, las fuerzas de atracción entre las moléculas ya no podrán mantenerlas juntas. El sólido se funde.

**VIDEO: Olla de presión y congelación al mismo tiempo**

La congelación es el inverso de este proceso. Las sustancias se congelan exactamente a la misma temperatura a la que se funden. A medida que se extrae energía de un líquido, el movimiento molecular disminuye hasta que al final las moléculas, en promedio, se mueven con suficiente lentitud como para que las fuerzas de atracción entre ellas puedan causar cohesión. Entonces las moléculas vibran en torno a posiciones fijas y forman un sólido.

Una sustancia pura tiene un punto de fusión o congelación definido a cualquier presión dada. La adición de cualquier impureza bajará esta temperatura. Por tanto, el punto de congelación o fusión sirve de indicador de la pureza de una sustancia. Por ejemplo, a presión atmosférica, el agua se congela a 0°C, a menos que tenga disueltas sustancias como azúcar o sal. Si es así, el punto de congelación es más bajo. En el caso de sal en agua, los iones cloro captan electrones de los átomos de hidrógeno en $H_2O$ e impiden la formación de cristales. El resultado de esta interferencia de iones "ajenos" es que se necesita un movimiento más lento para la formación de las estructuras hexagonales de los cristales de hielo. A medida que se forman los cristales de hielo, la interferencia se intensifica porque aumenta la proporción de moléculas o iones "ajenos" entre las moléculas de agua no fundidas. Las conexiones se vuelven cada vez más difíciles. La congelación puede completarse sólo cuando las moléculas de agua se mueven con la lentitud suficiente para que las fuerzas de atracción tengan una participación inusualmente importante en el proceso. El hielo que se forma primero casi siempre es $H_2O$ pura.

[2]"El congelador de agua" es mi presentación favorita del Exploratorium de San Francisco. Se coloca agua a temperatura ambiente en una cámara de vacío donde hierve de manera rápida y se convierte en hielo. La exposición se muestra en la tercera fotografía del inicio de este capítulo.

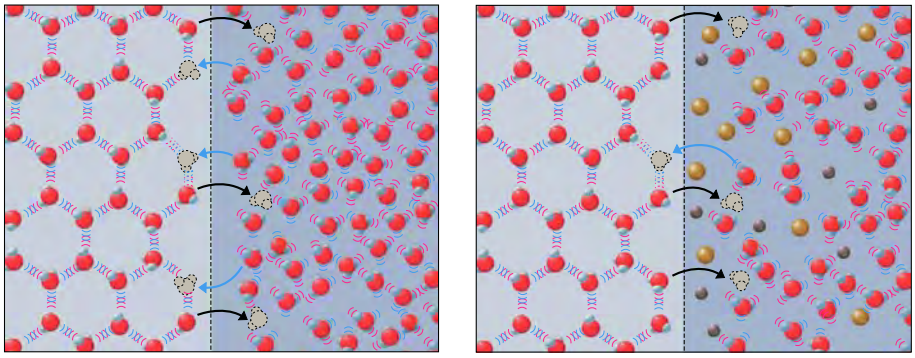



**FIGURA 17.15**
(a) En una mezcla de hielo y agua líquida a 0°C, el número de moléculas que entran en la fase sólida es igual al número de las que entran en la fase líquida. (b) Si se añade sal, disminuye el número de moléculas que entran en la fase sólida debido al número menor de moléculas líquidas en la interfaz.

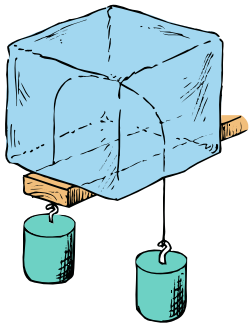


**FIGURA 17.16**
Rehielo. El alambre pasa de manera gradual a través del bloque de hielo sin cortarlo a la mitad.

## Rehielo

Puesto que las moléculas de $H_2O$ forman estructuras abiertas en la fase sólida, la aplicación de presión puede hacer que el hielo se funda. Los cristales simplemente se machacan a la fase líquida. (La temperatura del punto de fusión sólo baja un poco, en 0.007°C por cada atmósfera adicional de presión agregada.) Cuando la presión se elimina, las moléculas se cristalizan y ocurre de nuevo el congelamiento. Este fenómeno de fusión bajo presión y nueva congelación cuando la presión se reduce se llama **rehielo**. Es una de las propiedades del agua que la distinguen de otros materiales.

El rehielo se ilustra muy bien en la Figura 17.16 (y en la segunda fotografía del inicio de este capítulo). Un alambre muy delgado de cobre con pesos suspendidos en sus extremos cuelga sobre un bloque de hielo.[3] El alambre atravesará en forma lenta el hielo, pero su rastro quedará lleno con hielo. De modo que el alambre y los pesos caerán al suelo, y dejarán el hielo como un bloque sólido.

Hacer bolas de nieve es un buen ejemplo de rehielo. Cuando comprimes la nieve con las manos, produces una ligera fusión de los cristales de hielo; cuando retiras la presión, ocurre rehielo y mantiene unida la nieve. Hacer bolas de nieve es difícil en un clima muy frío porque la presión que puedes aplicar no es suficiente como para fundir la nieve.

## 17.6 Energía y cambios de fase

Si agregas calor de manera continua a un sólido o a un líquido, el sólido o el líquido a la larga cambiarán de fase. El sólido se licuará y el líquido se evaporará. Tanto para la licuefacción de un sólido como para la evaporación de un líquido se necesita una entrada de energía. Por el contrario, debe extraerse energía de una sustancia para cambiar su fase en la dirección de gas a líquido a sólido (Figura 17.17).

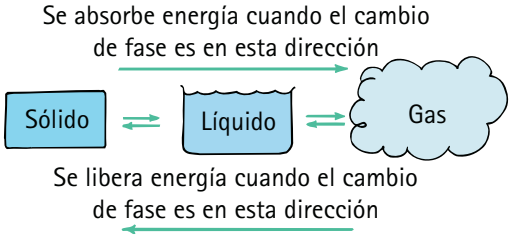



**FIGURA 17.17**
Cambios de energía con cambios de fase.

En el ciclo de enfriamiento de un refrigerador se utilizan muy bien los conceptos que se muestran en la Figura 17.17. Un refrigerador es una **bomba térmica** que "bombea" calor de un ambiente frío a uno caliente. Esto se logra mediante un líquido que tiene

[3]Los cambios de fase ocurren cuando el hielo se funde y el agua se vuelve a congelar. Para estos cambios se necesita energía. Cuando el agua que está encima del alambre vuelve a congelarse, cede energía. ¿Cuánta? Suficiente para fundir una cantidad igual de hielo inmediatamente debajo del alambre. Esta energía debe conducirse por el grosor del alambre. Por tanto, esta demostración exige que el alambre sea un excelente conductor de calor. Una cuerda, por ejemplo, no servirá.

un punto de ebullición bajo, el refrigerante, que se bombea al interior de la unidad enfriadora, donde se convierte en gas. Cuando el cambio de fase es de líquido a gas, se extrae calor del interior donde están los alimentos. El gas, con su energía agregada, se dirige afuera, hacia bobinas de condensación. En las bobinas, el calor se libera hacia el aire exterior a medida que el gas se condensa de nuevo a la fase líquida. La siguiente vez que estés cerca de un refrigerador, coloca la mano cerca de las bobinas condensadoras en la parte trasera, o en el fondo, y sentirás el aire que se calentó por la energía extraída del interior.

Cada vez con más frecuencia se utilizan bombas térmicas de varios diseños para calentar (y enfriar) las casas. Por lo general, utilizan menos energía que el combustible fósil para calentar una casa. Las bombas térmicas funcionan como un refrigerador estándar. Mientras que un refrigerador inevitablemente calienta la habitación al retirar calor del alimento que hay en su interior y depositarlo en sus bobinas de condensación, las bombas térmicas calientan la habitación *de manera deliberada*. En lugar de extraer calor de los alimentos, pueden extraer calor del agua que se bombea desde tuberías subterráneas cercanas.[4] El agua subterránea es relativamente caliente. Las temperaturas del subsuelo dependen de la latitud. En el medio oeste y las planicies centrales de Estados Unidos, la temperatura del subsuelo a una profundidad de un metro es de alrededor de 13°C (55°F) todo el año, más caliente que el aire en el invierno. Las tuberías subterráneas que están fuera de la casa transportan agua a 13°C hacia una bomba térmica en el interior de la casa. Entonces el refrigerante evaporado se bombea hacia las bobinas de condensación, donde se condensa y cede calor para calentar la casa. El agua fría regresa al suelo exterior, donde se calienta a temperatura del suelo y el ciclo se repite.

En verano, el proceso puede invertirse y convertir la bomba térmica en un enfriador. Un acondicionador de aire es en sí una bomba térmica. Si se aplican los mismos principios, simplemente bombea energía térmica del interior más frío de una casa al exterior más caliente en un día de verano. En una ciudad muy poblada, el efecto de miles de acondicionadores de aire en funcionamiento al mismo tiempo puede ser un pequeño aumento de la temperatura exterior.

De este modo, se ve que un sólido debe absorber energía para fundirse y un líquido debe absorber energía para evaporarse. Por el contrario, un gas debe liberar energía para licuarse y un líquido debe liberar energía para solidificarse.

Un refrigerador es una bomba térmica. Transfiere calor desde un ambiente frío y hacia un ambiente caliente. Un acondicionador de aire también es una bomba térmica, con el ambiente "frío" en el interior de la casa y el ambiente "caliente" en el exterior de la casa. En ambos casos, el dispositivo funciona con energía externa.

**SCREENCAST: Energía de los cambios de fase**

**SCREENCAST: Más sobre los cambios de fase**

**PUNTO DE CONTROL**

**Cuando se condensa $H_2O$ en la fase de vapor, ¿el aire circundante se calienta o enfría?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

El cambio de fase es de vapor a líquido, lo que libera energía (Figura 17.17), de modo que el aire circundante se calienta. Consulta en la Figura 17.8 otra forma de ver esto. Las moléculas de $H_2O$ que se condensan del aire son las más lentas. Retirarlas aumenta la energía cinética promedio de las moléculas restantes, de ahí el calentamiento. Esto va de la mano con el enfriamiento del agua cuando se evaporan las moléculas con movimiento más rápido, donde las que permanecen en la fase líquida tienen una energía cinética promedio más baja.

Observa, en particular, los cambios de fase que ocurren en $H_2O$. Para simplificar los números, piensa en un trozo de hielo de 1 g a una temperatura de –50°C en un recipiente cerrado que se coloca sobre una estufa para calentarse. Un termómetro en

[4]Dependiendo de la cantidad de calor necesaria, por lo general se colocan de 200 a 500 m de tubería en el exterior de la casa, en tramos de aproximadamente 1.0 a 1.8 m bajo la superficie del suelo. La configuración de la tubería puede ser de bucles horizontales o de formas en U verticales que lleguen a más profundidad.

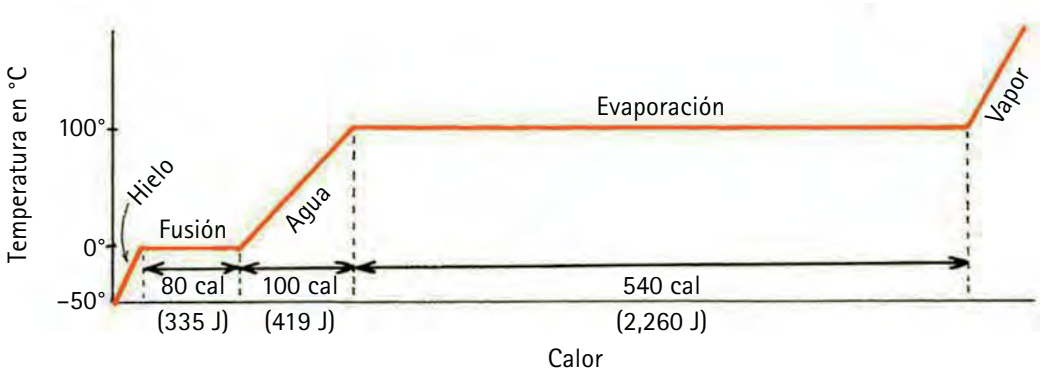



**FIGURA 17.18**
Gráfica que muestra la energía involucrada en el calentamiento y los cambios de fase de 1 g de $H_2O$.

El calor de fusión es la energía necesaria para separar moléculas de la fase sólida o también la energía liberada cuando se forman los enlaces en un líquido que lo cambian a la fase sólida.

El calor de evaporación del agua es enorme. La energía necesaria para evaporar una cantidad de agua en ebullición es casi siete veces la energía necesaria para fundir la misma cantidad de hielo.

El calor de vaporización es la energía necesaria para separar las moléculas de la fase líquida o también la energía liberada cuando el gas se condensa a la fase líquida.

el recipiente revela un aumento lento de temperatura hasta 0°C. Luego sucede algo sorprendente. La temperatura permanece en 0°C aun cuando continúe la entrada de calor. En lugar de calentarse más, el hielo comienza a fundirse. Para fundir todo el gramo de hielo, éste absorbe 80 calorías (335 joules) de energía, lo que no aumenta su temperatura ni siquiera una fracción de grado. Sólo cuando todo el hielo se funde, cada caloría adicional (4.19 joules) absorbida por el agua aumenta su temperatura en 1°C hasta que alcanza la temperatura de ebullición, 100°C. De nuevo, a medida que se agrega energía, la temperatura permanece constante mientras más del gramo de agua hierve y se convierte en vapor. El agua debe absorber 540 calorías (2,260 joules) de energía térmica para evaporar todo el gramo. Por último, cuando toda el agua se convierte en vapor a 100°C, la temperatura comienza a aumentar una vez más. Continúa aumentando en tanto se agregue energía. Este proceso se ilustra en la Figura 17.18.

Las 540 calorías (2,260 joules) necesarias para evaporar un gramo de agua equivalen a una gran cantidad de energía, mucha más de la que se necesita para transformar un gramo de hielo a cero absoluto hasta agua en ebullición a 100°C. Aunque las moléculas en el vapor y el agua en ebullición a 100°C tienen la misma energía cinética promedio, el vapor tiene más energía potencial porque las moléculas están relativamente libres unas de otras y no están ligadas como en la fase líquida. El vapor contiene una gran cantidad de energía que puede liberarse durante la condensación.

Puedes ver que las energías necesarias para fundir hielo (80 calorías, o 335 joules, por gramo) y para hervir agua (540 calorías, o 2,260 joules, por gramo) son las mismas que las cantidades liberadas cuando los cambios de fase son en la dirección opuesta. Los procesos son reversibles. La cantidad de energía que se necesita para cambiar una unidad de masa de cualquier sustancia de sólido a líquido (y viceversa) se llama **calor latente de fusión** de la sustancia. (La palabra *latente* recuerda que ésta es energía térmica oculta al termómetro.) En el caso del agua, ya viste que éste es de 80 calorías por gramo (335 joules por gramo). La cantidad de energía necesaria para cambiar cualquier sustancia de líquido a gas (y viceversa) se llama **calor latente de vaporización** de la sustancia. Para el agua, éste son unas monumentales 540 calorías por gramo (2,260 joules por gramo).[5] También sucede que estos valores relativamente altos se deben a las fuerzas poderosas entre las moléculas del agua: enlaces hidrógeno.

El gran valor de 540 calorías por gramo para el calor latente de vaporización del agua explica por qué, bajo algunas condiciones, el agua caliente se congelará más

[5]En unidades del SI, el calor de vaporización del agua se expresa como 2.260 megajoules por kilogramo (MJ/kg), y el calor de fusión del agua es 0.335 MJ/kg.

rápido que el agua tibia.[6] Este fenómeno se vuelve evidente cuando una delgada capa de agua se distribuye sobre una gran área, como cuando lavas un automóvil con agua caliente en un frío día invernal o mojas una pista de patinaje con agua caliente, lo que funde y suaviza las manchas rugosas y vuelve a congelarse con rapidez. La tasa de enfriamiento mediante evaporación rápida es muy alta porque cada gramo de agua en evaporación extrae al menos 540 calorías del agua que queda detrás. Ésta es una cantidad enorme de energía comparada con 1 caloría por grado Celsius que se extrae de cada gramo de agua que se enfría por conducción térmica. La evaporación verdaderamente es un proceso de enfriamiento.

**FIGURA 17.19**
En un día frío, el agua caliente puede congelarse más rápido que el agua tibia por la energía que sale del agua caliente durante la evaporación rápida.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Cuánta energía se transfiere cuando 1 g de vapor a 100°C se condensa a agua a 100°C?**
2. **¿Cuánta energía se transfiere cuando 1 g de agua hirviendo a 100°C se enfría a agua de hielo a 0°C?**
3. **¿Cuánta energía se transfiere cuando 1 g de agua de hielo a 0°C se congela a hielo a 0°C?**
4. **¿Cuánta energía se transfiere cuando 1 g de vapor a 100°C se convierte en hielo a 0°C?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Un gramo de vapor a 100°C transfiere 540 calorías de energía cuando se condensa para convertirse en agua a la misma temperatura.
2. Un gramo de agua hirviendo transfiere 100 calorías cuando se enfría 100°C para convertirse en agua de hielo.
3. Un gramo de agua de hielo a 0°C transfiere 80 calorías para convertirse en hielo a 0°C.
4. Un gramo de vapor a 100°C transfiere a los alrededores un gran total de los valores anteriores, 720 calorías, para convertirse en hielo a 0°C.

No te atreves a tocar con el dedo seco una sartén caliente sobre una estufa caliente, pero sin duda puedes hacerlo sin daño si primero te mojas el dedo y tocas la sartén muy brevemente. Incluso puedes tocarla varias veces seguidas en tanto tu dedo permanezca húmedo. Esto se debe a que la energía que de ordinario iría a quemarte el dedo se emplea en cambiar la fase de la humedad en tu dedo. La energía convierte la humedad en vapor, que entonces proporciona una capa de aislamiento entre tu dedo y la sartén. De igual modo, puedes juzgar lo caliente de una plancha si la tocas muy brevemente con el dedo mojado.

El ex supervisor Paul Ryan, del Departamento de Obras Públicas de Malden, Massachusetts, hace años usó plomo fundido para sellar tuberías en ciertas operaciones de plomería. Sorprendía a los mirones cuando arrastraba el dedo por el plomo fundido para juzgar su calor (Figura 17.20). Se aseguraba de que el plomo estuviera muy caliente y que su dedo estuviera totalmente húmedo antes de hacerlo. (No lo intentes por tu cuenta; si el plomo no está suficientemente caliente, ¡se te pegará al dedo y podrías sufrir una grave quemadura!) De igual modo, quienes caminan descalzos sobre fuego de carbones al rojo vivo con frecuencia prefieren los pies húmedos (otros, como Dave Willey en la Figura 17.21, prefieren los pies secos, pues afirman que los carbones calientes se pegan con más facilidad a los pies húmedos, ¡AY!). Sin embargo, la baja conductividad de los carbones de madera (como se estudió en el Capítulo 16) es la principal razón por la que no se queman los pies de quienes caminan descalzos sobre el fuego.

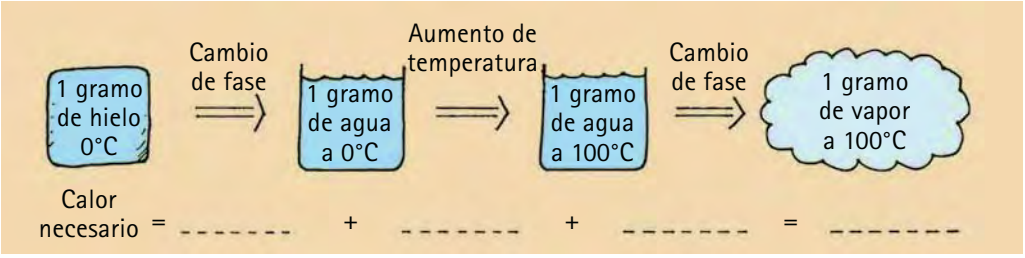
**FIGURA 17.20**
Para probar qué tan caliente está el plomo fundido, Paul Ryan arrastra el dedo mojado por él.

**FIGURA 17.21**
El profesor Dave Willey camina descalzo sobre carbones de madera al rojo vivo sin quemarse.

[6]El agua en ebullición no se congelará antes que el agua fría, pero se congelará antes que el agua moderadamente caliente. Por ejemplo, el agua en ebullición se congelará antes que el agua que esté a una temperatura de más de unos 60°C, pero no antes que el agua con una temperatura menor que 60°C. Inténtalo y observa.

## PRACTICANDO LA FÍSICA

Escribe el número de calorías o joules de cada paso para el cambio de fase de 1 g de hielo a 0°C a vapor a 100°C.




### PUNTO DE CONTROL

**Supón que 4 g de agua hirviendo se vierten sobre una superficie fría y que 1 g se evapora rápidamente. Si la evaporación toma 540 calorías de los restantes 3 g de agua y no tiene lugar otra transferencia de calor, ¿cuál será la temperatura de los restantes 3 g?**

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

Los restantes 3 g se convertirán en hielo a 0°C. 540 calorías de 3 g significa que cada gramo cede 180 calorías. 100 calorías de un gramo de agua hirviendo reducen su temperatura a 0°C y retirar 80 calorías más lo convierten en hielo. Es por esto que el agua caliente se convierte rápido en hielo en un ambiente congelante. (En la práctica, debido a otra transferencia de calor, se necesitaría más de 1 g de los 4 g originales para evaporar y congelar el resto.)

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Evaporación.** El cambio de fase de líquido a gaseoso.

**Sublimación.** El cambio de fase de sólido a gaseoso, sin pasar por la fase líquida.

**Condensación.** El cambio de fase de gaseoso a líquido.

**Ebullición.** Rápida evaporación que tiene lugar dentro de un líquido, así como en su superficie.

**Rehielo.** Proceso de fusión bajo presión y la posterior congelación cuando se elimina la presión.

**Bomba térmica.** Dispositivo que transfiere calor, lo quita de un ambiente frío y lo coloca en un ambiente caliente.

**Calor latente de fusión.** Cantidad de energía necesaria para cambiar una unidad de masa de una sustancia de sólido a líquido (y liberada en el proceso inverso).

**Calor latente de vaporización.** Cantidad de energía necesaria para cambiar una unidad de masa de una sustancia de líquido a gas (y liberada en el proceso inverso).

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 17.1 Fases de la materia

1. ¿Cuáles son las cuatro fases comunes de la materia?

### 17.2 Evaporación

2. ¿Las moléculas de un líquido tienen todas aproximadamente la misma rapidez, o tienen una gran variedad de rapideces?
3. ¿Qué es la evaporación?
4. ¿Por qué la evaporación es un proceso de enfriamiento?
5. ¿Qué es la sublimación?

### 17.3 Condensación

6. Distingue entre condensación y evaporación.
7. ¿Por qué una quemadura con vapor es más dañina que una quemadura con agua hirviendo a la misma temperatura?
8. ¿Por qué te sientes incómodamente caliente en un día caluroso y húmedo?
9. Distingue entre humedad y humedad relativa.
10. ¿Por qué el vapor de agua en el aire se condensa cuando el aire es frío?

11. ¿Por qué el aire húmedo caliente forma nubes cuando se eleva?
12. ¿Cuál es la diferencia básica entre una nube y la niebla?

### 17.4 Ebullición

13. Distingue entre evaporación y ebullición.
14. ¿El aumento de presión atmosférica incrementa o disminuye el punto de ebullición del agua?
15. En una olla de presión, ¿qué cuece más rápido los alimentos: la ebullición del agua o la mayor temperatura del agua?
16. ¿Por qué el agua en el fondo de un géiser no hervirá cuando esté a 100°C?
17. ¿Qué ocurre con la presión del agua en el fondo de un géiser cuando parte del agua superior sale a borbotones?
18. ¿Por qué la energía añadida al agua en ebullición no aumenta la temperatura del agua?
19. ¿Cuándo hervirá el agua a una temperatura menor a 100°C?
20. ¿Qué evidencia puedes citar en cuanto a la afirmación de que el agua puede hervir a una temperatura de 0°C?

### 17.5 Fusión y congelación

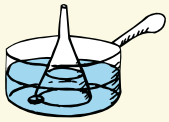
21. ¿Por qué aumentar la temperatura de un sólido hace que se funda?
22. ¿Por qué disminuir la temperatura de un líquido hace que se congele?
23. ¿Por qué el agua no se congela a 0°C cuando están presentes iones ajenos?
24. ¿Qué ocurre con la estructura hexagonal abierta del hielo cuando se le aplica suficiente presión?
25. ¿Por qué un alambre no simplemente corta en dos un bloque de hielo cuando lo atraviesa?

### 17.6 Energía y cambios de fase

26. ¿Un líquido libera energía o absorbe energía cuando cambia a gas?
27. ¿Un líquido libera energía o absorbe energía cuando cambia a sólido?
28. El calor que se descarga en las bobinas de condensación después de la bomba de compresión de un refrigerador, ¿tiene que ver con vaporización o condensación del líquido refrigerante?
29. ¿Cuántas calorías se necesitan para cambiar la temperatura de 1 g de agua en 1°C? ¿Para fundir 1 g de hielo a 0°C? ¿Para evaporar 1 g de agua en ebullición a 100°C?
30. Cita dos razones por las que quienes caminan sobre fuego no se queman los pies húmedos cuando caminan descalzos sobre carbones al rojo vivo.

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

31. Coloca un embudo Pyrex boca abajo en una sartén llena de agua de modo que el tubo estrecho del embudo sobresalga del agua. Apoya una parte del embudo sobre un clavo o una moneda de tal manera que el agua pueda entrar bajo él. Coloca la sartén sobre una estufa y observa el agua cuando comienza a hervir. ¿Dónde se forman primero las burbujas? ¿Por qué? A medida que las burbujas suben, se expanden con rapidez y empujan agua fuera de ellas. El embudo confina el agua, que es forzada a subir por el tubo y salir por la parte superior. ¿Ahora sabes cómo funcionan un géiser y una cafetera percoladora?



32. Observa el pico de una tetera con agua hirviendo. Observa que no puedes ver el vapor que sale del pico. La nube que ves más lejos del pico no es vapor, sino gotas de agua condensadas. Ahora sostén la llama de una vela en la nube de vapor condensado. ¿Puedes explicar lo que observas?
33. Puedes producir lluvia en tu cocina. Coloca una taza de agua en una sartén Pyrex o una cafetera de vidrio y caliéntala en forma lenta sobre una flama baja. Cuando el agua esté caliente, coloca una cacerola llena con cubos de hielo encima del recipiente. Conforme el agua de abajo se calienta, en la parte inferior de la cacerola fría se forman gotas y se combinan hasta que son tan grandes que caen, lo que produce una "lluvia" estable conforme el agua que está abajo se calienta suavemente. ¿En qué se parece esto a la manera en que se produce la lluvia natural y en qué difiere?

34. Mide la temperatura del agua hirviendo y la temperatura de una solución en ebullición de sal y agua. ¿Cuál es la diferencia?
35. Haz como Dean Baird demuestra en la fotografía 2 al inicio del capítulo, o como muestra el siguiente dibujo, y suspende un peso pesado con un alambre de cobre sobre un cubo de hielo. En cuestión de minutos, el alambre atravesará el hielo. El hielo se fundirá bajo el alambre y volverá a congelarse sobre él, lo que dejará una trayectoria visible si el hielo es transparente.

36. Escribe una carta a la abuela y explícale por qué llevar el agua a la ebullición cuando ella prepara té en realidad es un proceso que *enfría* el agua. Explica cómo podría convencer a sus amigas del té sobre este concepto intrigante.

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

*La cantidad de calor con cambio de temperatura es $Q = cm\Delta T$. Para un cambio de fase del agua es $Q = mL$, donde $L_f$ es el calor de fusión, 80 cal/g, y $L_v$ es el calor de vaporización, 540 cal/g.*

37. La cantidad de calor $Q$ que cambia la temperatura $\Delta T$ de una masa $m$ de sustancia está dada por $Q = cm\Delta T$, donde $c$ es la capacidad calorífica específica de la sustancia. Por ejemplo, para $H_2O$, $c = 1$ cal/g·°C. Y para un cambio de fase, la cantidad de calor $Q$ que cambia la fase de una masa $m$ es $Q = mL$, donde $L$ es el calor de fusión o calor de vaporización de la sustancia. Por ejemplo, para $H_2O$, el calor de fusión es 80 cal/g (u 80 kcal/kg) y el calor de vaporización es 540 cal/g (o 540 kcal/kg). Usa estas relaciones para determinar el número de calorías para cambiar (a) 1 kg de hielo a 0°C en agua de hielo a 0°C, (b) 1 kg de agua de hielo a 0°C en 1 kg de agua en ebullición a 100°C,

(c) 1 kg de agua en ebullición a 100°C en 1 kg de vapor a 100°C, y (d) 1 kg de hielo a 0°C en 1 kg de vapor a 100°C.

38. La capacidad calorífica específica del hielo es de unos 0.5 cal/g·°C, y supón que permanece en dicho valor todo el tiempo hasta el cero absoluto. Calcula el número de calorías que tomaría cambiar un cubo de hielo de 1 g a cero absoluto (−273°C) en 1 g de agua en ebullición. ¿Cómo se compara este número de calorías con el número de calorías necesarias para cambiar el mismo gramo de agua en ebullición a 100°C en vapor a 100°C?
39. Encuentra la masa de hielo a 0°C que fundirían completamente 10 g de vapor a 100°C.
40. Considera 50 g de agua caliente a 80°C vertida en una cavidad de un bloque de hielo muy grande a 0°C. ¿Cuál será la temperatura final del agua en la cavidad? Demuestra que deben fundirse 50 g de hielo para enfriar el agua caliente hasta esta temperatura.
41. Un trozo de 50 g de hierro a 80°C se suelta en una cavidad de un bloque de hielo muy grande a 0°C. Demuestra que se fundirán 5.5 g de hielo. (La capacidad calorífica específica del hierro es 0.11 cal/g·°C.)
42. Si sueltas un trozo de hielo sobre una superficie dura, la energía del impacto fundirá parte del hielo. Cuanto más alto se suelte, más hielo se fundirá con el impacto. Demuestra que, para fundir en su totalidad un bloque de hielo que cae sin arrastre aerodinámico, lo ideal es soltarlo de una altura de 34 km. [*Sugerencia*: iguala los joules de energía potencial gravitacional con el producto de la masa de hielo y su calor de fusión (en unidades del SI, 335,000 J/kg). ¿Ves por qué la respuesta no depende de la masa?]
43. Una bola de 10 kg de hierro se suelta sobre el pavimento desde una altura de 100 m. Si la mitad del calor generado se destina a calentar la bola, encuentra el aumento de temperatura de la bola. (En unidades del SI, la capacidad calorífica específica del hierro es 450 J/kg·°C.) ¿Por qué la respuesta es la misma para una bola de cualquier masa?
44. El calor de vaporización del alcohol etílico es de cerca de 200 cal/g. Si se permitiera la evaporación de 2 kg de este fluido en un refrigerador, demuestra que se formarían 5 kg de hielo con agua a 0°C.

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

45. Clasifica las temperaturas del agua en ebullición, de mayor a menor, en estas ubicaciones:
    a. Death Valley,
    b. nivel del mar,
    c. Denver, CO (la "ciudad de una milla de altura").
46. De mayor a menor, clasifica las energías necesarias para estos cambios de fase para iguales cantidades de $H_2O$:
    a. De hielo a agua de hielo.
    b. De agua de hielo a agua hirviendo.
    c. De agua hirviendo a vapor.

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

47. Cuando sales de una alberca en un día caliente y seco en el suroeste, sientes mucho frío. ¿Por qué?
48. ¿Por qué el sudor es un mecanismo eficiente para enfriarte en un día caluroso?
49. ¿Por qué soplar sobre la sopa caliente la enfría?
50. ¿Qué sucede con la temperatura de una cacerola con agua cuando la evaporación excede la condensación?
51. ¿Cuál es la fuente de energía que mantiene en operación al pájaro bebedor de la Figura 17.4?
52. Un inventor afirma haber desarrollado un nuevo perfume que dura mucho tiempo porque no se evapora. Comenta acerca de esta afirmación.
53. ¿Un ventilador eléctrico común enfría el aire en una habitación? Si no es así, ¿entonces por qué se usa en una habitación extremadamente caliente?
54. ¿Por qué si enrollas una botella en una tela húmeda en un día de campo se enfría más que si colocas la botella en una cubeta con agua fría?
55. El cuerpo humano puede mantener su temperatura habitual de 37°C en un día cuando la temperatura esté por arriba de 40°C. ¿Cómo sucede esto?
56. Las ventanas de panel doble tienen gas nitrógeno o aire muy seco entre los paneles. ¿Por qué el aire ordinario es una mala idea?
57. ¿Por qué los *icebergs* con frecuencia están rodeados de niebla?
58. ¿Cómo la Figura 17.8 ayuda a explicar la humedad que se forma dentro de las ventanas de un automóvil cuando estás estacionado con tu novia en una noche fría?
59. Tú sabes que las ventanas en tu casa caliente se humedecen en un día frío. ¿Pero puede formarse humedad en las ventanas si el interior de tu casa es frío en un día caluroso? ¿Cuál es la diferencia?
60. En los días helados, con frecuencia se forma escarcha en las ventanas. ¿Por qué, por lo general, hay más escarcha en las porciones inferiores de las ventanas?
61. ¿Por qué a menudo se forman nubes sobre los picos de las montañas? (*Sugerencia*: considera las corrientes ascendentes.)
62. ¿Por qué tienden a formarse nubes arriba de una isla plana o una montañosa en medio del océano? (*Sugerencia*: compara la capacidad calorífica específica de la tierra con la del agua y las posteriores corrientes de convección en el aire.)
63. Una gran cantidad de vapor de agua cambia de fase para convertirse en agua en las nubes que forman una tormenta. ¿Este proceso libera energía térmica o la absorbe?
64. ¿Por qué la temperatura del agua en ebullición permanece igual en tanto el calentamiento y la ebullición continúen?
65. ¿Por qué las burbujas de vapor en una cacerola de agua hirviendo aumentan de tamaño a medida que se elevan en el agua?
66. ¿Por qué la temperatura de ebullición del agua disminuye cuando el agua está bajo presión reducida, como cuando está a una mayor altitud?
67. Coloca un frasco con agua sobre un pequeño soporte dentro de una sartén de agua, de modo que el fondo del frasco se mantenga arriba del fondo de la sartén. Cuando la sartén se coloque sobre una estufa, el agua de la sartén hervirá, pero no el agua del frasco. ¿Por qué?

68. Los respiraderos hidrotérmicos son aberturas en el suelo marino que descargan agua muy caliente. El agua que sale casi a 280°C de uno de tales respiradores en la costa de Oregon, a unos 2,400 m bajo la superficie, no está en ebullición. Ofrece una explicación.
69. El agua hervirá en forma espontánea en un vacío... en la superficie de la Luna, por ejemplo. ¿Podrías cocinar un huevo en esta agua en ebullición? Explica.
70. Tu amigo inventor propone un diseño de utensilios de cocina que permitan la ebullición a una temperatura menor que 100°C, de modo que los alimentos puedan cocerse con menor consumo de energía. Comenta acerca de esta idea.
71. ¿Qué puede salir mal si agarras el mango de una sartén caliente con un trapo delgado de cocina húmedo?
72. ¿Cómo puede hervir el agua sin calentarla?
73. Si el agua que hierve debido a una presión reducida no está caliente, ¿entonces el hielo formado por la presión reducida no está frío? Explica.
74. Tu profesor te entrega un frasco cerrado, lleno parcialmente con agua a temperatura ambiente. Cuando lo sostienes, la transferencia de calor entre tus manos desnudas y el frasco hace que el agua hierva. ¡Muy impresionante! ¿Cómo se logró esto?
75. Cuando hierves papas, ¿el tiempo de cocción se reducirá con agua que hierve vigorosamente en lugar de con agua que hierve moderadamente? (Las instrucciones para cocinar espagueti te piden que el agua esté hirviendo vigorosamente, no para reducir el tiempo de cocción sino para evitar algo más. Si no sabes de lo que se trata, pregunta a un cocinero.)
76. ¿Por qué colocar una tapa sobre una cacerola con agua sobre una estufa acorta el tiempo para que el agua hierva, en tanto que, después de que el agua hierve, el uso de una tapa sólo acorta un poco el tiempo de cocción?
77. En la planta eléctrica de un submarino nuclear, la temperatura del agua en el reactor es mayor que 100°C. ¿Cómo es posible esto?
78. Explica por qué las erupciones de muchos géiseres se repiten con notable regularidad.
79. ¿Por qué el agua del radiador de un automóvil en ocasiones hierve en forma explosiva cuando se quita la tapa del radiador?
80. ¿El hielo puede ser más frío que 0°C? ¿Cuál es la temperatura de una mezcla de agua y hielo?
81. ¿Por qué el hielo muy frío es "pegajoso"?
82. ¿Cómo se compara el punto de congelación de un líquido con su punto de fusión?
83. Las personas que viven donde las nevadas son comunes te dirán que las temperaturas del aire son más altas cuando nieva que cuando está claro. Algunos malinterpretan esto y dicen que la nevada no puede ocurrir en días muy fríos. Explica esta mala interpretación.
84. ¿Cómo podría desalinizarse el agua mediante congelación?
85. ¿Qué produce el lado inferior húmedo de un glaciar, que le permite deslizarse desde regiones elevadas?
86. ¿El rehielo ocurriría si los cristales de hielo no tuvieran una estructura abierta? Explica.
87. Un trozo de metal y una masa igual de madera se retiran de un horno caliente a la misma temperatura y se sueltan sobre bloques de hielo. El metal tiene una capacidad calorífica específica más baja que la madera. ¿Cuál fundirá más hielo antes de enfriarse a 0°C?
88. ¿Cómo es que fundir hielo cambia la temperatura del aire circundante?
89. Cuando entras en una cabaña de esquí caliente en un día frío, tus gafas se empañan. ¿Por qué ocurre esto?
90. ¿Qué explican los extremos abultados de una lata de gaseosa que se congela?
91. ¿Por qué el ponche de frutas medio congelado siempre es más dulce que el ponche de frutas completamente derretido?
92. ¿Es condensación o vaporización lo que ocurre en las bobinas externas calientes de un acondicionador de aire en operación?
93. Algunas personas mayores descubrieron que, cuando enrollaban papel alrededor del hielo en sus neveras, evitaban la fusión. Discute lo aconsejable de esta práctica.
94. Cuando se funde el hielo en un estanque, ¿qué efecto tiene esto sobre la temperatura del aire cercano?
95. ¿Por qué una tina con agua colocada en el sótano de productos enlatados de una granja ayuda a evitar que la comida enlatada se congele en los inviernos fríos?
96. ¿Por qué rociar los árboles frutales con agua antes de una helada ayuda a proteger la fruta de la congelación?
97. ¿Cómo es que los dispositivos que calientan las casas en el invierno también pueden usarse para enfriar las casas en verano?
98. ¿Por qué jadea un perro acalorado?
99. Elabora una pregunta de opción múltiple sobre los cambios de energía en la evaporación y la condensación.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

100. El alcohol se evapora más rápido que el agua a la misma temperatura. Discute cuál produce más enfriamiento: el alcohol o la misma cantidad de agua sobre tu piel.
101. Tú puedes determinar la dirección del viento si humedeces tu dedo y lo sostienes alto en el aire. Discute por qué.
102. Hay más de una razón por la que verter una taza de café caliente en una cacerola resulta en un enfriamiento más rápido. Analiza dos razones.
103. Supón que todas las moléculas de un líquido tienen la misma rapidez, no rapideces aleatorias. ¿La evaporación de este líquido causaría el enfriamiento del líquido restante? Discute.
104. En los climas calurosos, los viajeros usan bolsas de lona porosas llenas de agua. Analiza por qué, cuando las bolsas se cuelgan en el exterior de un automóvil en rápido movimiento, el agua en su interior se enfría mucho.
105. ¿Cuándo puedes agregar calor a algo sin aumentar su temperatura?
106. ¿Cuándo puedes agregar calor al hielo sin fundirlo?
107. ¿Cuándo puedes extraer calor de algo sin bajar su temperatura?
108. Analiza por qué el agua puede salir de respiraderos submarinos profundos a temperaturas de unos 300°C sin hervir.
109. Discute cuál es el gas predominante en una burbuja de agua hirviendo.
110. Las unidades de aire acondicionado no contienen agua, aunque es común ver agua gotear cuando operan en un día caluroso. Discute.

18

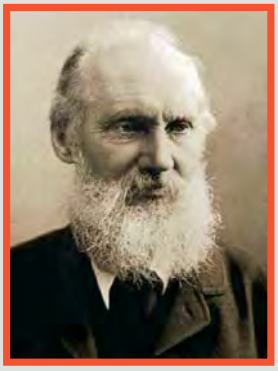
CAPÍTULO 18

# Termodinámica


18.1 Termodinámica
18.2 El cero absoluto
18.3 La primera ley de la termodinámica
18.4 Procesos adiabáticos
18.5 La meteorología y la primera ley
18.6 La segunda ley de la termodinámica
18.7 La energía tiende a dispersarse
18.8 Entropía

**1** Después de hervir un poco de agua en una lata de un galón y luego sellar la lata cuando el vapor de agua ha sacado la mayor parte del aire, Dan Johnson y sus alumnos observan la lata estrujarse lentamente. Él motiva a sus estudiantes a discutir cómo la condensación y la presión atmosférica explican este fenómeno. **2** A una escala mayor, P. O. Zetterberg utiliza una bomba de vacío para reducir la presión del aire dentro de un tambo de petróleo 50 veces más grande. **3** Barbara y Tomas Brage ayudan conforme la presión atmosférica sobre el exterior hace su trabajo, ¡para beneplácito de la clase! **4** Ole Anton Haugland sostiene una lata "vacía" boca abajo. Aage Mellem coloca una flama en su abertura, que calienta y expande el aire en su interior, lo que a su vez infla el globo morado; ajá: tal como ocurre en el funcionamiento de un globo aerostático.

Lord Kelvin, por quien se le dio el nombre a la escala de temperatura Kelvin, publicó más de 600 artículos científicos y registró un total de 70 patentes. Comenzó como William Thomson, nacido en 1824 en Belfast, Irlanda. Educado al principio por su padre, el joven Thomson comenzó a estudiar en la división infantil de la University of Glasgow a los 10 años de edad, después de que su padre se mudó a dicha ciudad escocesa. Publicó su primer ensayo académico cuando tenía 16 años de edad. Después de terminar sus estudios en Glasgow, se mudó a la University of Cambridge y se graduó con honores en 1845, a los 21 años de edad. Al año siguiente era profesor titular de filosofía natural en la University of Glasgow. No hay duda: William Thomson era un genio.



Entre las materias que estudió Thomson está el calor, y en 1847 definió la escala de temperatura absoluta, a la que después se le puso su nombre. También fue un fuerte defensor del sistema métrico de medición. Y en 1856 fue el primero en introducir el término *energía cinética*. Introdujo el teléfono Bell en Bretaña y ayudó a planificar el primer cable trasatlántico, diseñó un medidor eléctrico sensible que condujo a la transmisión rápida de señales en código Morse entre Europa y América del Norte. Por este éxito, fue nombrado caballero. El gobierno británico expresó aún más su reconocimiento en 1892 y nombró barón a Thomson. Desde entonces fue lord Kelvin, y tomó su título del río Kelvin, que corría a través de su finca en Glasgow.

Kelvin hizo una estimación de la edad de la Tierra, un tema controvertido en la época. Para comenzar sus cálculos supuso que la temperatura original de la Tierra era la temperatura del Sol. A partir de mediciones de tasas de enfriamiento en roca calculó el tiempo que tardaría en enfriarse un cuerpo del tamaño de la Tierra. Estimó la edad de la Tierra en aproximadamente 100 millones de años. Lo que Kelvin desconocía en la época era el fenómeno de radiactividad y su importancia para mantener caliente el interior de la Tierra.

Incluso los científicos más admirables cometen errores y algunos, peor todavía, los defienden con evidencia que los contradice. Kelvin defendió tozudamente su cálculo de 100 millones de años a lo largo de su vida y refutó las conclusiones de Darwin acerca de la evolución como imposibles en el periodo de 100 millones de años. También dijo que las aeronaves más pesadas que el aire serían imposibles. En 1900 afirmó: "No hay nada nuevo por descubrir en física ahora. Todo lo que resta son mediciones cada vez más precisas". A pesar de estas serias opiniones erróneas en sus últimos años, sus logros en ciencia e ingeniería fueron enormes. Cuando murió en 1907, fue enterrado junto a Isaac Newton en la Abadía de Westminster.

## 18.1 Termodinámica

Kelvin fue el primero en acuñar la palabra **termodinámica** (que surge de las palabras griegas que significan "movimiento de calor"). La ciencia de la termodinámica surgió a comienzos del siglo XIX, antes de comprender la teoría atómica y molecular de la materia. Debido a que las primeras personas que trabajaron en la termodinámica sólo tenían vagas nociones de los átomos y no sabían nada de los electrones ni otras partículas microscópicas, los modelos que usaron invocaron nociones macroscópicas (como trabajo mecánico, presión y temperatura) y sus funciones en las transformaciones de energía.

Las dos piedras angulares de la termodinámica son la conservación de la energía y el hecho de que el calor fluye de manera espontánea de caliente a frío y no del modo contrario. La termodinámica proporciona la teoría básica de las máquinas térmicas, desde las turbinas de vapor hasta los reactores nucleares, y la teoría básica de los refrigeradores y las bombas térmicas. Las leyes de la termodinámica arremetieron contra los sueños de inventores e industriales que creían en la posibilidad de una máquina de movimiento perpetuo: un dispositivo que, al recibir una entrada inicial de energía, siguiera funcionando de manera indefinida sin mayor entrada. El estudio de la termodinámica comienza con un vistazo a uno de sus primeros conceptos: un límite inferior para la temperatura.

**SCREENCAST:** Termodinámica

## 18.2 El cero absoluto

En principio, no hay un límite superior para la temperatura. A medida que aumenta el movimiento térmico, un objeto sólido primero se funde y luego se evapora; a medida que la temperatura aumenta aún más, las moléculas se descomponen en átomos y los

El cero absoluto no es lo más frío que puedes *alcanzar*. Es lo más frío a lo que puedes esperar aproximarte. (Los investigadores han estado a una mil millonésima de grado de él.)

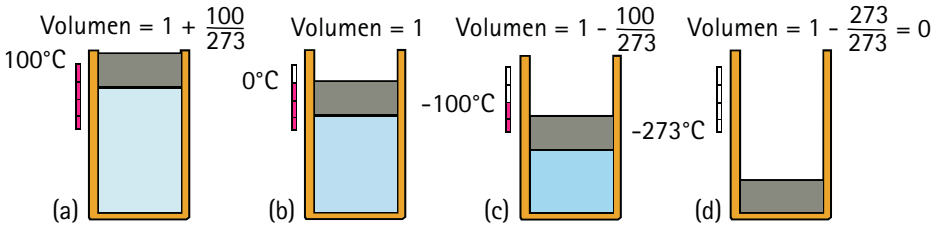



**FIGURA 18.1**
El pistón gris dentro del vaso baja a medida que el volumen del gas (azul) se encoge. El volumen del gas a 0°C cambia en 1/273 de su volumen con cada cambio de 1°C de temperatura cuando la presión se mantiene constante. (a) A 100°C, el volumen es 100/273 mayor de lo que es en (b), cuando su temperatura es 0°C. (c) Cuando la temperatura se reduce a −100°C, el volumen se reduce en 100/273. (d) A −273°C, el volumen del gas se reduciría en 273/273 y de este modo idealmente sería cero.

átomos pierden algunos o todos sus electrones, y por tanto forma una nube de partículas con carga eléctrica: un plasma. Esta situación existe en las estrellas, donde la temperatura es de muchos millones de grados Celsius.

Por el contrario, hay un límite determinado en el otro extremo de la escala de temperatura. Los gases se expanden cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían. Los experimentos del siglo XIX descubrieron que todos los gases, sin importar sus presiones o volúmenes iniciales, cambian en 1/273 de su volumen a 0°C por cada grado Celsius de cambio en temperatura, siempre que la presión se mantenga constante. De modo que, si un gas a 0°C se enfriara en 273°C, se contraería, de acuerdo con esta regla, en 273/273 de su volumen y se reduciría a volumen cero. Es evidente que no es posible tener una sustancia con volumen cero.

Los científicos también descubrieron que la presión de cualquier gas en cualquier recipiente de volumen fijo cambia en 1/273 de su presión a 0°C por cada grado Celsius de cambio de temperatura. De modo que un gas en un recipiente de volumen fijo enfriado a 273°C bajo cero no tendría presión en absoluto. En la práctica, todo gas se licua antes de enfriarse tanto. No obstante, estas disminuciones en pequeñas cantidades de 1/273 sugirieron la idea de una temperatura más baja: −273°C. De modo que hay límite para la frialdad.

Cuando los átomos y las moléculas pierden toda la energía cinética disponible, llegan al **cero absoluto** de temperatura. A cero absoluto, como se estudió en forma breve en el Capítulo 15, no puede extraerse más energía de una sustancia y ya no es posible una mayor reducción de su temperatura. Esta temperatura límite en realidad es 273.15° bajo cero en la escala Celsius (y 459.7° bajo cero en la escala Fahrenheit).

La escala de temperatura absoluta se llama escala Kelvin, en honor de lord Kelvin, quien fue el primero en sugerir esta escala de temperatura termodinámica. El cero absoluto es 0 K (abreviatura para "0 kelvin", en lugar de "0 grados kelvin"). En la escala

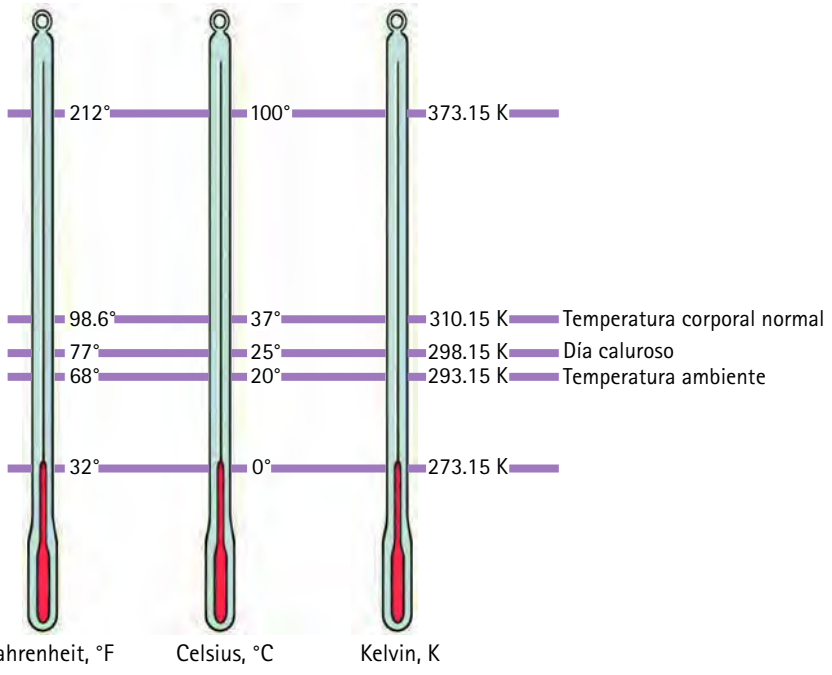



**FIGURA 18.2**
Temperaturas familiares en diferentes escalas.

Kelvin no hay números negativos. Los grados en la escala Kelvin están calibrados con las divisiones del mismo tamaño que la escala Celsius. Por ende, el punto de fusión del hielo es 273.15 K y el punto de ebullición del agua es 373.15 K.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Qué es más grande: un grado Celsius o un kelvin?**
2. **Un matraz de gas helio tiene una temperatura de 0°C. Si un segundo matraz idéntico, que contiene una masa igual de helio, está el doble de caliente (tiene el doble de energía interna), ¿cuál es su temperatura en kelvin? ¿En grados Celsius?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Ninguno. Son iguales.
2. Un recipiente de helio el doble de caliente tiene el doble de temperatura absoluta, o 2 veces 273 K, que es 546 K. Esto es 273°C. (Tan sólo resta 273 de la temperatura Kelvin para convertir a grados Celsius. ¿Puedes ver por qué?)

## Energía interna

Como se estudió brevemente en el Capítulo 15, hay una gran cantidad de energía encerrada en todos los materiales. En este libro, por ejemplo, el papel está compuesto de moléculas que están en constante movimiento. Tienen energía cinética. Debido a las interacciones con moléculas vecinas, también tienen energía potencial. Las páginas pueden quemarse con facilidad, así que se sabe que almacenan energía química, que en realidad es energía potencial eléctrica a nivel molecular. Se sabe que hay grandes cantidades de energía asociadas a los núcleos atómicos. Entonces, hay la "energía del ser", descrita por la célebre ecuación $E = mc^2$ (energía masa). La energía a nivel partícula dentro de una sustancia se encuentra en estas y otras formas que, cuando se consideran en conjunto, se denominan **energía interna**.[1] Si bien la energía interna incluso en la sustancia más simple puede ser muy compleja, en el estudio de los cambios de calor y flujo de calor sólo te importarán los *cambios* en la energía interna de una sustancia. Los cambios de temperatura indican estos cambios en la energía interna.

**FIGURA 18.3**
Algunas temperaturas absolutas.

## 18.3 La primera ley de la termodinámica

Hace unos 200 años se pensaba que el calor era un fluido invisible llamado *calórico*, que fluye como el agua de los objetos calientes a los objetos fríos. El calórico parecía conservarse; esto es: parecía fluir de un lugar a otro sin crearse ni destruirse. Esta idea fue la precursora de la ley de conservación de la energía. Hacia mediados del siglo XIX, muchos años después de que Rumford demostrara que el calor no era una sustancia encerrada en la materia, se aceptó que el flujo de calor no era más que el flujo de energía en sí. La teoría calórica del calor se fue abandonando poco a poco.[2] En la actualidad, el calor se ve como energía que se transfiere de un lugar a otro, por lo general mediante colisiones moleculares. El calor es energía en tránsito.

¿Buscas un plan de dieta? Consume menos calorías de las que quemas. Éste es el único plan de dieta que se basa firmemente en la primera ley de la termodinámica.

[1]Si un libro se suspendiera en el borde de una mesa y estuviera listo para caer, poseería energía potencial gravitacional; si se lanzara al aire, poseería energía cinética. Pero éstos no son ejemplos de energía interna, porque involucran más que sólo las partículas de las cuales está compuesto el libro. Incluyen interacciones gravitacionales con la Tierra y movimiento con respecto a la Tierra. Hay una diferencia entre la energía interna de un libro y las formas de energía externa que también pueden actuar sobre el libro.

[2]Las ideas populares, cuando se demuestra que son equivocadas, rara vez se descartan de inmediato. Las personas tienden a identificarse con las ideas que caracterizan su época; por tanto, con frecuencia son los jóvenes quienes tienen más probabilidad de descubrir y aceptar ideas nuevas e impulsar la aventura humana.

Cuando la ley de conservación de la energía se amplió e incluyó el calor, se le denominó **primera ley de la termodinámica**. Parte de dicha ley puede enunciarse en la forma siguiente:

**Cuando el calor fluye hacia o desde un sistema, el sistema gana o pierde una cantidad de energía igual a la cantidad de calor transferido.**

Por *sistema* se entiende un grupo bien definido de átomos, moléculas, partículas u objetos. El sistema puede ser el vapor de una máquina de vapor o puede ser toda la atmósfera de la Tierra. Incluso puede ser el cuerpo de una criatura viva. El punto importante es que debes poder definir qué está contenido *dentro* del sistema y qué está *afuera* de él. Si agregas calor al vapor de una máquina de vapor, a la atmósfera de la Tierra o al cuerpo de una criatura viva, agregas energía al sistema. El sistema puede "aprovechar" este calor para aumentar su propia energía interna o realizar trabajo sobre sus alrededores. De modo que agregar calor a un sistema hace una o ambas de dos cosas: (1) aumenta la energía interna del sistema, si permanece en el sistema, o (2) realiza trabajo sobre las cosas externas al sistema, si sale del sistema. De manera más específica, la primera ley afirma:

**Calor agregado a un sistema = aumento de energía interna + trabajo externo realizado por el sistema.**

La primera ley es un principio general que no se ocupa del funcionamiento interno del sistema. Cualesquiera que sean los detalles del comportamiento molecular en el sistema, el calor agregado o aumenta la energía interna de un sistema o permite al sistema realizar trabajo externo (o ambos). La posibilidad de describir y predecir el comportamiento de los sistemas sin la necesidad de analizar complicados procesos atómicos y moleculares es una de las bellezas de la termodinámica. La termodinámica tiende un puente entre los mundos microscópico y macroscópico.

Considera una cantidad dada de energía suministrada a una máquina de vapor, ya sea en una planta eléctrica o un barco nuclear. La cantidad de energía suministrada se hará evidente por la creciente energía interna del vapor y el trabajo mecánico realizado. La suma del aumento de energía interna y el trabajo realizado igualarán la entrada de energía. De ninguna manera la energía de salida puede superar la energía de entrada. La primea ley de la termodinámica es simplemente la versión térmica de la ley de conservación de la energía.

Agregar calor a un sistema de modo que el sistema pueda realizar trabajo mecánico sólo es una aplicación de la primera ley de la termodinámica. Si, en lugar de agregar calor, realizas trabajo mecánico sobre el sistema, la primera ley te dice qué puedes esperar: un aumento de la energía interna. Frota tus palmas de las manos una con otra y se calentarán. O frota dos varas secas y sin duda se calentarán más. O bombea el mango de una bomba de bicicleta y la bomba se calentará. ¿Por qué? Porque principalmente se realiza trabajo mecánico sobre el sistema y se aumenta su energía interna. Si el proceso ocurre tan rápido que muy poco calor se conduce fuera del sistema, entonces la mayor parte del trabajo de entrada se emplea en aumentar la energía interna, y la temperatura sube.

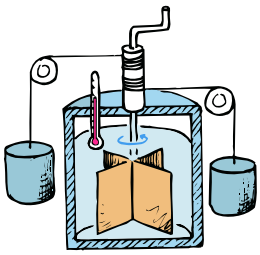


**FIGURA 18.4**
Aparato de rueda de paletas utilizado para comparar el calor con la energía mecánica. A medida que los pesos caen, ceden energía potencial (mecánica), que se convierte en calor que calienta el agua. Esta equivalencia de energía mecánica y térmica la demostró por primera vez James Joule, en cuyo honor la unidad de energía lleva su nombre.

**FIGURA 18.5**
Cuando realizas trabajo sobre la bomba al bajar el pistón, comprimes el aire en el interior. ¿Qué ocurre con la temperatura del aire encerrado? ¿Qué ocurre con la temperatura del aire si se expande y empuja el pistón hacia afuera?

## PUNTO DE CONTROL

1. **Si 100 J de calor se agregan a un sistema que no realiza trabajo externo, ¿en cuánto aumenta la energía interna de dicho sistema?**
2. **Si 100 J de calor se agregan a un sistema que realiza 40 J de trabajo externo, ¿en cuánto aumenta la energía interna de dicho sistema?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. 100 J.
2. 60 J. A partir de la primera ley se ve que 100 J = 60 J + 40 J.

## 18.4 Procesos adiabáticos

Comprimir o expandir un gas mientras no entra ni sale calor del sistema se dice que es un **proceso adiabático** (del griego para "intransitable"). Las condiciones adiabáticas pueden lograrse cuando un sistema se aísla térmicamente de sus alrededores (con espuma de estireno, por ejemplo) o cuando se realiza el proceso tan rápido que el calor no tenga tiempo de entrar o salir. Por tanto, en un proceso adiabático, puesto que no entra ni sale calor del sistema, la parte del "calor agregado" de la primera ley de la termodinámica debe ser cero. Entonces, bajo condiciones adiabáticas, los cambios en la energía interna son iguales al trabajo realizado sobre o por el sistema.

Por ejemplo, si realizas trabajo *sobre* un sistema al comprimirlo, su energía interna aumenta: se eleva su temperatura. Esto se observa con el calentamiento de una bomba de bicicleta cuando el aire se comprime. Por el contrario, si el trabajo es realizado *por* el sistema, su energía interna disminuye: se enfría. Esto se observa en la frialdad de una válvula de neumático si escapa el aire de ella y se expande. El gas que se expande rápidamente se enfría.

Puedes demostrar el enfriamiento del aire mientras se expande si repites el experimento personal de soplar sobre tu mano, estudiado en el Capítulo 16. Sopla aire sobre tu mano, primero con la boca abierta y luego con los labios juntos de modo que el aire se expanda (Figura 16.5 del Capítulo 16). ¡Tu aliento es mucho más frío cuando el aire se expande!

Conforme se expande un gas, cede parte de su energía al realizar trabajo sobre sus alrededores. Por tanto, el gas se enfría.

**VIDEO:**
**Proceso adiabático**

## 18.5 La meteorología y la primera ley

La termodinámica es útil para los meteorólogos cuando analizan el clima. Los meteorólogos expresan la primera ley de la termodinámica en la siguiente forma:

> **La temperatura del aire aumenta a medida que se agrega calor o se aumenta la presión.**

La temperatura del aire puede cambiar si se agrega o sustrae calor, si se cambia la presión del aire (lo que involucra trabajo) o ambos. El calor se agrega mediante radiación solar, mediante radiación terrestre de onda larga, mediante condensación de humedad o por contacto con el suelo caliente. Esto resulta en un aumento de la temperatura del aire. La atmósfera puede perder calor mediante radiación al espacio, por evaporación de la lluvia que cae a través del aire seco o por contacto con superficies frías. El resultado es un descenso de la temperatura del aire.

Hay algunos procesos atmosféricos en los que la cantidad de calor agregado o sustraído es muy pequeña, tan pequeña que el proceso es casi adiabático. Entonces se tiene la forma adiabática de la primera ley:

> **La temperatura del aire aumenta (o desciende) a medida que la presión aumenta (o disminuye).**

Los procesos adiabáticos en la atmósfera son característicos de partes del aire, llamadas *parcelas*, que tienen dimensiones que van del orden de decenas de metros hasta kilómetros. Dichas parcelas son tan grandes que el aire exterior no se mezcla mucho con el aire de su interior durante los minutos u horas que existen. Se comportan como si estuvieran encerradas en gigantescas bolsas de tela ligera. A medida que una parcela fluye hacia arriba por el lado de una montaña, su presión disminuye, lo que permite su expansión y enfriamiento. La presión reducida resulta en una temperatura reducida.[3]

Las mediciones muestran que la temperatura de una parcela de aire seco disminuirá 10°C por una reducción de la presión que corresponda a un aumento en altitud de

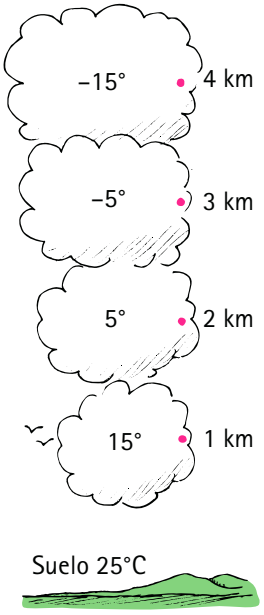



**FIGURA 18.6**
La temperatura de una parcela de aire seco que se expande adiabáticamente disminuye alrededor de 10°C por cada kilómetro de elevación.

[3]Recuerda que, en el Capítulo 16, el enfriamiento del aire en expansión se abordó a nivel microscópico porque se tuvo en cuenta el comportamiento de las moléculas en colisión. En termodinámica, sólo se consideran las mediciones macroscópicas de temperatura y presión para llegar a los mismos resultados. Es bueno analizar las cosas desde más de un punto de vista.

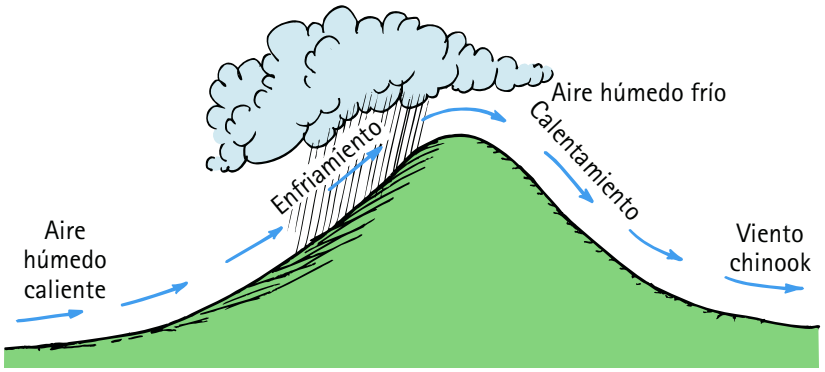



**FIGURA 18.7**
Los chinook, que son vientos cálidos secos, ocurren cuando aire de gran altitud desciende y se calienta adiabáticamente.

1 kilómetro. De modo que el aire seco se enfría 10°C por cada kilómetro de ascenso (Figura 18.6). El aire que fluye sobre las montañas altas o se eleva en las tormentas o en los ciclones puede cambiar de elevación por varios kilómetros. En consecuencia, si una parcela de aire seco a nivel del suelo, con una temperatura agradable de 25°C, se elevara 6 km, la temperatura sería de unos helados −35°C. Por otra parte, si el aire a una temperatura típica de –20°C a una altitud de 6 km desciende al suelo, su temperatura sería de unos tremendos 40°C. Un ejemplo espectacular de este calentamiento adiabático es el *chinook*, un viento que sopla desde las montañas Rocosas y atraviesa las grandes planicies estadounidenses. El aire frío que baja de las pendientes de las montañas se comprime en un volumen menor y se calienta mucho (Figura 18.7). El efecto de la expansión o compresión sobre los gases es muy impresionante.[4]

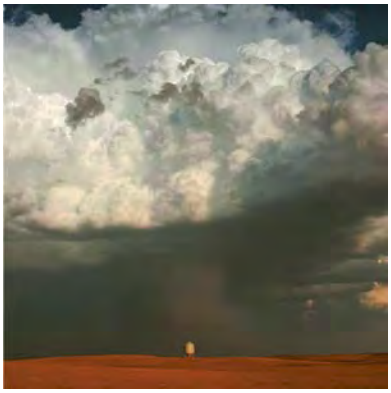


**FIGURA 18.8**
La nube de tormenta es resultado del rápido enfriamiento adiabático de una masa ascendente de aire húmedo. Ésta obtiene energía de la condensación del vapor de agua.

Una parcela en ascenso se enfría a medida que se expande. Pero el aire circundante también es más frío a mayores elevaciones. La parcela seguirá elevándose en tanto esté más caliente (y, por tanto, menos densa) que el aire circundante. Si se vuelve más fría (más densa) que sus alrededores, se hundirá. Bajo ciertas condiciones, grandes parcelas de aire frío se hunden y permanecen a bajo nivel, con el resultado de que el aire superior es más caliente. Cuando las regiones superiores de la atmósfera son más calientes que las regiones más bajas, se tiene una **inversión de temperatura** (conocido también como inversión térmica). Si algo de aire caliente en ascenso es más denso que esta capa superior de aire caliente, no se elevará más. A menudo esto se vuelve evidente sobre un lago frío donde los gases y las partículas visibles, como el humo, se dispersan en una capa plana arriba del lago en lugar de elevarse y disiparse más alto en la atmósfera (Figura 18.9). Las inversiones de temperatura atrapan el esmog y otros contaminantes térmicos. El esmog de Los Ángeles está atrapado por dicha inversión, causada por aire frío de bajo nivel proveniente del océano, sobre el cual hay una capa de aire caliente que se movió sobre las montañas, procedente del más caliente desierto Mojave. Las montañas ayudan a contener el aire atrapado (Figura 18.10). Las montañas en las orillas de Denver tienen la función similar de atrapar el esmog bajo una inversión de temperatura.[5]

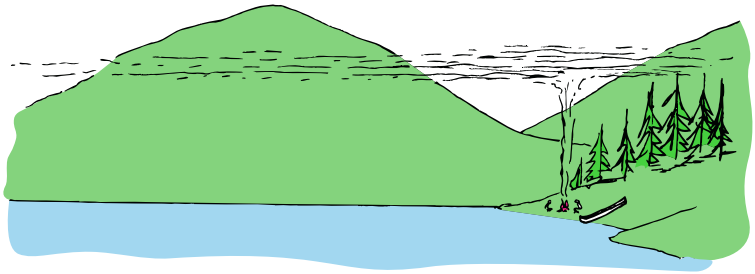


**FIGURA 18.9**
La capa de humo de la fogata sobre el lago indica una inversión de temperatura. El aire arriba del humo es más caliente que el humo; el aire abajo es más frío.

[4]Es muy interesante que, cuando vuelas a grandes alturas, donde la temperatura del aire exterior por lo general es de −35°C, estás muy cómodo en tu cabina caliente, mas no debido a calentadores. El proceso de comprimir aire exterior a la presión de la cabina, que se aproxima a la presión atmosférica a nivel del mar, por lo general calentaría el aire a unos rostizantes 55°C (131°F). Así que deben usarse acondicionadores de aire para extraer el calor del aire presurizado.

[5]Estrictamente hablando, los meteorólogos llaman inversión térmica a cualquier perfil de temperatura que obstruya la convección ascendente, incluidos casos en los que las regiones superiores de aire están más frías pero no tan frías como para permitir una convección ascendente continua.

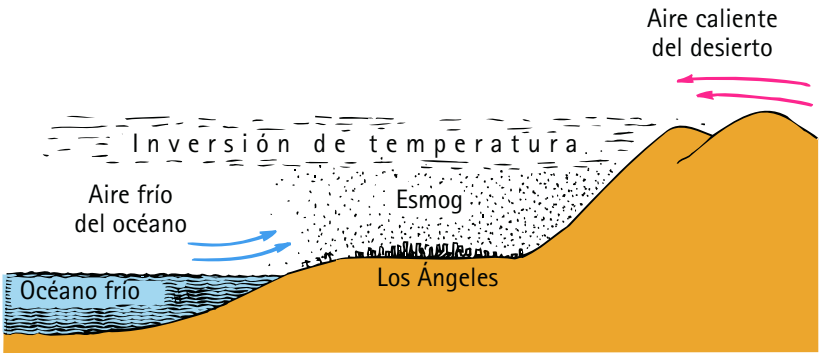



**FIGURA 18.10**
El esmog de Los Ángeles está atrapado por las montañas y una inversión de temperatura causada por aire caliente proveniente del desierto Mojave sobrepuesto al aire frío proveniente del Océano Pacífico.

Las parcelas adiabáticas no están restringidas a la atmósfera y los cambios en ellas no necesariamente ocurren de forma rápida. Algunas corrientes marinas profundas tardan miles de años en circular. Las masas de agua son tan enormes y las conductividades son tan bajas que no se transfieren cantidades apreciables de calor hacia o desde dichas parcelas durante dichos periodos largos. Se calientan o enfrían adiabáticamente mediante cambios en la presión. Los cambios en la convección oceánica adiabática, como lo demuestran sucesos como el recurrente fenómeno El Niño, tienen un gran efecto sobre el clima de la Tierra. La convección oceánica está influida por la temperatura del lecho marino, el cual, a su vez, está influido por las corrientes de convección en el material fundido que yace bajo la corteza de la Tierra (Figura 18.11). Es muy difícil conocer el comportamiento del material fundido en el manto de la Tierra. Una vez que comienza a elevarse una parcela profunda de material líquido caliente dentro del manto, ¿seguirá elevándose hasta la corteza de la Tierra? ¿O su tasa de enfriamiento adiabático la encontrará más fría y más densa que sus alrededores, en cuyo punto se hundirá? ¿La convección se autoperpetúa? En la actualidad, los geofísicos ponderan estas preguntas.

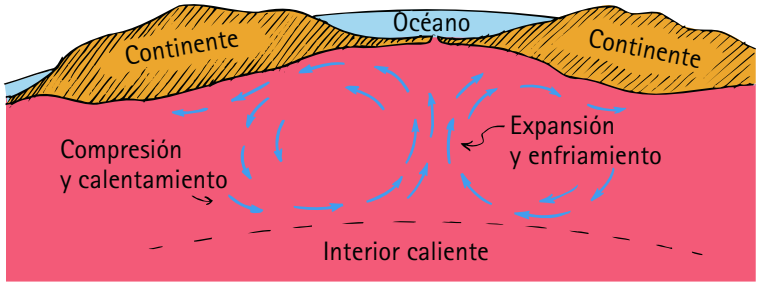



**FIGURA 18.11**
¿Las corrientes de convección en el manto de la Tierra impulsan a los continentes mientras derivan a través de la superficie del globo? ¿Las parcelas ascendentes de material fundido se enfrían más rápido o más lento que el material circundante? ¿Las parcelas que se hunden se calientan a temperaturas por arriba o abajo de las de los alrededores? Las respuestas a estas preguntas todavía no se conocen al momento de escribir esto.

## PUNTO DE CONTROL

1. **Si una parcela de aire seco a 0°C en un inicio se expande adiabáticamente mientras fluye hacia arriba a lo largo de una montaña una distancia vertical de 1 km, ¿cuál será su temperatura? ¿Cuál será su temperatura cuando haya subido 5 km?**
2. **¿Qué sucede con la temperatura del aire en un valle cuando el aire frío que sopla por las cimas de las montañas desciende hacia el valle?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. A 1 km de elevación, su temperatura será –10°C; a 5 km de elevación, –50°C.
2. El aire se comprime adiabáticamente y la temperatura del valle aumenta. De esta forma, los residentes de algunas ciudades del valle de las montañas Rocosas, como Salida, Colorado, experimentan un clima "bananero" a mediados de invierno.

**pti**

- A las nubes en las cimas de las montañas creadas por un enfriamiento adiabático forzado, en efecto una convección forzada, los meteorólogos las llaman *nubes orográficas.* Dichas "nubes lenticulares" a menudo se confunden con OVNI.

## 18.6 La segunda ley de la termodinámica

Supón que colocas un ladrillo caliente junto a un ladrillo frío en una región térmicamente aislada. Sabes que el ladrillo caliente se enfriará a medida que ceda calor al ladrillo frío, que se calentará. Los dos ladrillos llegarán a una temperatura común: equilibrio térmico. No se perderá energía, de acuerdo con la primera ley de la termodinámica. Pero supón que el ladrillo caliente extrae calor del ladrillo frío y se calienta más. ¿Esto violaría la primera ley de la termodinámica? No, si el ladrillo frío se vuelve correspondientemente más frío, de modo que la energía combinada de ambos ladrillos permanece igual. Si esto ocurriera, no violaría la primera ley de la termodinámica.

Pero violaría la **segunda ley de la termodinámica**. La segunda ley identifica la dirección de transformación de energía en los procesos naturales. La segunda ley de la termodinámica puede enunciarse en muchas formas, pero, dicho de manera muy simple:

**El calor por sí mismo nunca fluye de un objeto frío a un objeto caliente.**

En invierno, el calor fluye del interior de una casa caliente al aire frío exterior. En verano, el calor fluye del aire caliente exterior al interior más frío. La dirección del flujo espontáneo de calor es de caliente a frío. El calor puede hacerse fluir en la dirección contraria, del más frío al más caliente, pero sólo si se realiza trabajo sobre el sistema o si se agrega energía desde otra fuente, como sucede con las bombas térmicas y los acondicionadores de aire, los cuales hacen que el calor fluya desde lugares más fríos hacia más calientes.

La enorme cantidad de energía interna del océano no puede usarse para encender una sola bombilla sin esfuerzo externo. La energía por sí misma no fluirá del océano a menor temperatura hacia el filamento de la bombilla a mayor temperatura. Sin esfuerzo externo, la dirección del flujo de calor es *de* caliente *a* frío.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿La energía interna de un enorme *iceberg* puede explotarse para realizar trabajo?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

De acuerdo con la segunda ley, puede hacer trabajo sobre cosas más frías, pero no sobre cosas más calientes. La energía fluye espontáneamente de caliente a frío, no en la dirección contraria.

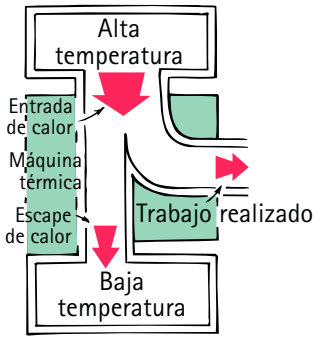



**FIGURA 18.12**
Cuando el calor de una máquina térmica fluye del depósito a temperatura alta hacia el sumidero a temperatura baja, parte del calor puede convertirse en trabajo. (Si se pone trabajo en una máquina térmica, el flujo de calor puede ser desde el sumidero a temperatura baja hacia el depósito a temperatura alta, como en un refrigerador o acondicionador de aire.)

### Máquinas térmicas

Las máquinas fueron el punto focal de la Revolución Industrial durante finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX. Con las esperanzas frustradas por las máquinas de movimiento perpetuo, los científicos e industriales se centraron en la eficiencia de las máquinas reales y los motores que las impulsaban.

Una **máquina térmica** es cualquier dispositivo que utiliza calor como entrada y proporciona trabajo mecánico como salida. La idea básica detrás de una máquina térmica (ya sea máquina de vapor, motor de combustión interna o motor jet) es que puede obtenerse trabajo mecánico sólo cuando el calor fluye desde una temperatura alta hacia una temperatura baja. En toda máquina térmica, sólo parte del calor puede transformarse en trabajo. Cuando se piensa en máquinas térmicas, se habla de *depósitos*. El calor fluye de un depósito de temperatura alta a uno con temperatura baja. Toda máquina térmica (1) gana calor de un depósito de mayor temperatura, lo que aumenta la energía interna de la máquina; (2) convierte parte de esta energía en trabajo mecánico y (3) expulsa la energía restante como calor hacia algún depósito de menor temperatura, por lo general llamado *sumidero* (Figura 18.12). En un motor de gasolina, por ejemplo, (1) los productos de la quema de combustible en la cámara de combustión proporcionan el depósito de temperatura alta; (2) los gases calientes realizan trabajo

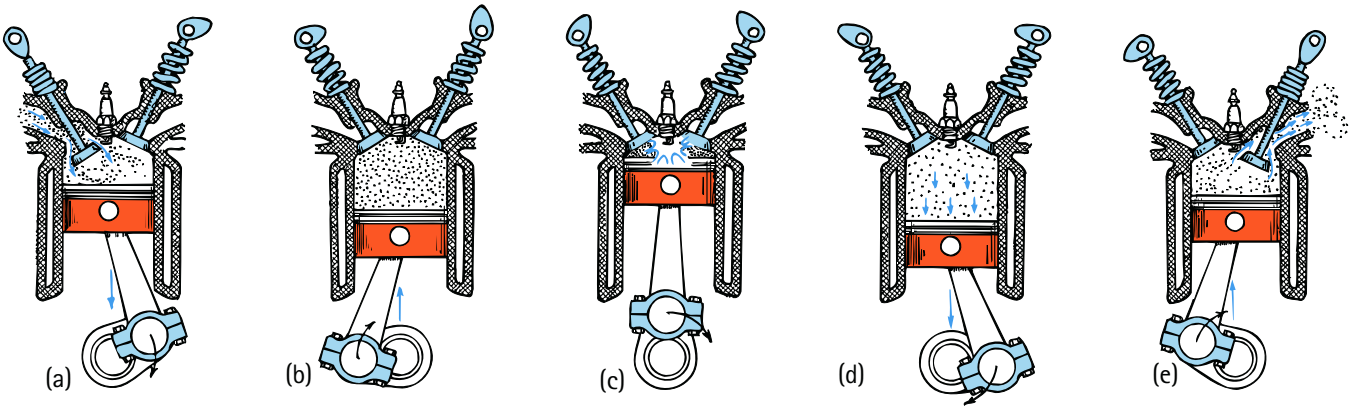



**FIGURA 18.13**
Un motor de gasolina de combustión interna a cuatro tiempos. (a) Una mezcla de aire y combustible llena el cilindro a medida que el pistón baja. (b) El pistón se mueve hacia arriba y comprime la mezcla, adiabáticamente, porque no se transfiere mucho calor adentro o afuera. (c) La bujía se enciende e inflama la mezcla, lo que la eleva a una temperatura alta. (d) La expansión adiabática empuja el pistón hacia abajo, el golpe de potencia. (e) Los gases quemados se empujan fuera de la válvula de escape. Entonces se abre la válvula de admisión y el ciclo se repite. Estas etapas pueden ponerse de manera diferente: (a) succión, (b) compresión, (c) explosión, (d) empuje y (e) expulsión.

mecánico sobre el pistón, y (3) el calor se expulsa al ambiente a través del sistema de enfriamiento y del escape (Figura 18.13).

La segunda ley dice que ninguna máquina térmica puede convertir todo el calor suministrado en energía mecánica. Sólo *parte* del calor puede transformarse en trabajo, con el resto expulsado en el proceso. Aplicada a máquinas térmicas, la segunda ley puede enunciarse así:

**Cuando una máquina térmica que opera entre dos temperaturas, $T_{\text{caliente}}$ y $T_{\text{fría}}$, realiza trabajo, sólo parte del calor de entrada a $T_{\text{caliente}}$ puede convertirse en trabajo, y el resto se expulsa a $T_{\text{fría}}$.**

Toda máquina térmica desecha algo de calor, lo cual puede ser deseable o indeseable. El aire caliente expulsado por una lavandería o un horno de panadería en un frío día invernal puede ser muy deseable, en tanto que el mismo aire caliente en un caluroso día de verano es otra cosa. Cuando el calor expulsado es indeseable se le llama *contaminación térmica*.

Antes de que los científicos entendieran la segunda ley, muchas personas pensaban que una máquina térmica de muy baja fricción podría convertir casi toda la energía térmica de entrada en trabajo útil. Pero no es así. En 1824, el ingeniero francés Nicolas Léonard Sadi Carnot[6] analizó el funcionamiento de una máquina térmica y realizó un descubrimiento fundamental. Demostró que la mayor fracción de energía de entrada que puede convertirse en trabajo útil, incluso bajo condiciones ideales, depende de la diferencia de temperatura entre el depósito caliente y el sumidero frío. La ecuación de Carnot es

$$\text{Eficiencia ideal} = \frac{T_{\text{caliente}} - T_{\text{fría}}}{T_{\text{caliente}}}$$

donde $T_{\text{caliente}}$ es la temperatura del depósito caliente y $T_{\text{fría}}$ es la temperatura del sumidero frío.[7] La eficiencia ideal depende de la diferencia de temperatura entre la admisión y el escape. Siempre que haya razones de temperaturas, debe usarse la escala de temperatura

Una importante fuente de agua para un camello no es su joroba, sino su nariz tan grande, que le permite extraer agua de su propia respiración exhalada. Sus narinas interiores están estructuradas para recapturar de manera efectiva la mayor parte de la humedad contenida en el aire caliente saturado de agua que sale de sus pulmones.

La temperatura corporal de los camellos puede aumentar varios grados arriba de lo normal sin causar un golpe de calor. Su exceso de calor se disipa cuando la temperatura del aire desciende en la noche.

[6]Carnot fue hijo de Lazare Nicolas Marguerite Carnot, quien creó los 14 ejércitos después de la revolución, que defendieron Francia contra toda Europa. Después de su derrota en Waterloo, Napoleón dijo a Lazare: "Monsieur Carnot, lo conocí demasiado tarde". Pocos años después de producir su famosa ecuación, Nicolas Léonard Sadi Carnot murió trágicamente a la edad de 36 años, durante una epidemia de cólera que azotó París.

[7]Eficiencia = salida de trabajo/entrada de calor. A partir de la conservación de la energía, entrada de calor = salida de trabajo + calor que fluye afuera a baja temperatura (véase la Figura 18.12). De modo que: salida de trabajo = entrada de calor − salida de calor y eficiencia = (entrada de calor − salida de calor)/(entrada de calor). En el caso ideal, puede demostrarse que la razón (salida de calor)/(entrada de calor) = $T_{\text{fría}}/T_{\text{caliente}}$. Entonces puede decirse: eficiencia ideal = $(T_{\text{caliente}} - T_{\text{fría}})/T_{\text{caliente}}$.

absoluta, de modo que $T_{caliente}$ y $T_{fría}$ se expresan en kelvin. Por ejemplo, cuando el depósito caliente de una turbina de vapor está a 400 K (127°C) y el sumidero está a 300 K (27°C), la eficiencia ideal es:

$$\frac{400-300}{400}=\frac{1}{4}$$

Esto significa que, incluso bajo condiciones ideales, sólo 25% del calor suministrado por el vapor puede convertirse en trabajo, en tanto que el restante 75% se expulsa como desecho. Es por esto que el vapor se supercalienta a temperaturas altas en las máquinas de vapor y las plantas eléctricas. Mientras mayor sea la temperatura del vapor que impulsa un motor o turbogenerador, mayor es la posible eficiencia de la producción de energía. Por ejemplo, si la temperatura operativa del ejemplo citado fuera 600 K, en lugar de 400 K, la eficiencia sería de (600 − 300)/600 = ½, que es el doble de la eficiencia a 400 K.

En la Figura 18.14 puedes ver la importancia de la diferencia de temperatura entre el depósito de calor y el sumidero en el funcionamiento del motor de la turbina de vapor. El depósito caliente es vapor proveniente del calentador y el sumidero frío es la región de escape del condensador. El vapor caliente ejerce presión y realiza trabajo sobre los álabes cuando empuja sobre sus lados frontales. Esto es bueno. Pero, ¿y si la misma presión de vapor también se ejerciera sobre la *parte posterior* de los álabes? Esto sería contraproducente

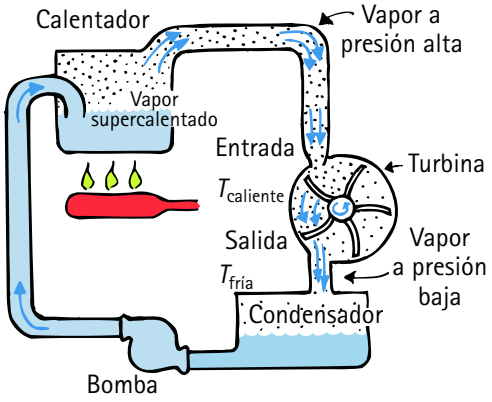



**FIGURA 18.14**
El ciclo de vapor. La turbina gira porque la presión ejercida por el vapor a alta temperatura sobre el lado frontal de los álabes de la turbina es mayor que el ejercido por el vapor a baja temperatura sobre el lado posterior de los álabes. Sin una diferencia de presión, la turbina no giraría y suministraría energía a una carga externa (como a un generador eléctrico). La presencia de presión de vapor sobre el lado posterior de los álabes, incluso sin fricción, impide que la turbina sea una máquina perfectamente eficiente.

## ¡ESCENIFICACIÓN DE LA TERMODINÁMICA!

Coloca una pequeña cantidad de agua en una lata de aluminio de gaseosa y caliéntala sobre una estufa hasta que emita vapor por la abertura. Cuando esto ocurre, el aire fue sacado y se sustituyó con vapor. Después, con un par de pinzas, invierte de manera rápida la lata en un plato con agua. ¡Crac! ¡La lata se aplasta por la presión atmosférica! ¿Por qué?

Cuando las moléculas de vapor encuentran el agua del plato, ocurre condensación, la que deja una presión muy baja en la lata, gracias a la cual la presión atmosférica circundante aplasta la lata. Aquí ves, de manera espectacular, cómo la presión se reduce por la condensación. ¿Ahora puedes entender mejor la importancia de la condensación en la turbina de la Figura 18.14?

y nada agradable. Es vital que se reduzca la presión sobre la parte trasera de los álabes. ¿Cómo se hace? De la misma forma como se reduce la presión interior en la lata de vapor en el proceso descrito en el recuadro "¡Escenificación de la termodinámica!" Si condensas el vapor, la presión sobre las partes posteriores de los álabes se reduce muchísimo. Se sabe que, con vapor confinado, la temperatura y la presión van de la mano: aumenta la temperatura y aumentas la presión; disminuye la temperatura y disminuyes la presión. De modo que la diferencia de presión necesaria para el funcionamiento de una máquina térmica se relaciona directamente con la diferencia de temperatura entre la fuente y el sumidero. Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura, mayor será la eficiencia.[8]

La ecuación de Carnot establece el límite superior de eficiencia para toda máquina térmica, ya sea un automóvil, un barco nuclear o un avión jet. En la práctica, la fricción siempre está presente en todas las máquinas y la eficiencia siempre es menor que la ideal.[9] De este modo, mientras que la fricción es la única responsable de las ineficiencias de muchos dispositivos, el concepto decisivo en el caso de las máquinas térmicas es la segunda ley de la termodinámica: sólo parte del calor de entrada puede convertirse en trabajo, incluso sin fricción.

**FIGURA 18.15**
La Pirámide Transamérica y algunos otros edificios se calientan mediante iluminación eléctrica, que es la razón por la que las luces están encendidas la mayor parte del tiempo.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Cuál sería la eficiencia ideal de una máquina si su depósito caliente y su escape estuvieran a la misma temperatura, por decir, a 400 K?**
2. **¿Cuál sería la eficiencia ideal de una máquina que tenga un depósito caliente a 400 K y un depósito frío mantenido de alguna forma en cero absoluto?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Eficiencia cero: (400 − 400)/400 = 0. De modo que no es posible la salida de trabajo en ninguna máquina térmica a menos que exista una diferencia de temperatura entre el depósito y el sumidero.
2. Uno: (400 − 0)/400 = 1. Sólo en este caso idealizado es posible una eficiencia ideal de 100%.

## 18.7 La energía tiende a dispersarse

La primera ley de la termodinámica afirma que la energía no puede crearse ni destruirse. Habla de la *cantidad* de energía. La segunda ley califica esto al agregar que la forma que toma la energía en las transformaciones se "deteriora" a formas menos útiles. Habla de la *calidad* de la energía, pues la energía se dispersa y a final de cuentas se degenera en desecho. Otra forma de decir esto es que la energía organizada (energía de alta calidad, concentrada y, por tanto, útil) se degrada en energía desorganizada (energía de baja calidad no utilizable). Por ejemplo, una vez que el agua fluye sobre una cascada, pierde su potencial para trabajo útil. De igual modo con la gasolina, donde la energía organizada se degrada conforme se quema en el motor de un automóvil. La energía útil se degrada a formas no útiles y es incapaz de realizar el mismo trabajo

**FIGURA 18.16**
Las moléculas de perfume escapan con facilidad de la botella (un estado más ordenado) al aire (un estado menos ordenado), no viceversa.

[8]El físico Victor Weisskopf cuenta la historia de un ingeniero que explica el funcionamiento de una máquina de vapor a un campesino. El ingeniero explica con detalle el ciclo de vapor de la máquina, con lo cual el campesino pregunta: "sí, entiendo todo eso, ¿pero dónde está el caballo?". Es difícil abandonar la forma de mirar el mundo cuando llega un método novedoso que sustituye las formas establecidas.

[9]La eficiencia ideal del motor de combustión interna de un automóvil es más de 50%, pero, en la práctica, la eficiencia real es de cerca de 25%. Las máquinas con temperaturas operativas más altas (comparadas con las temperaturas del sumidero) serían más eficientes, pero el punto de fusión de los materiales de la máquina limita las temperaturas superiores a las que pueden funcionar. Los motores de los automóviles eléctricos, que están ganando popularidad, sobrepasan por completo las dependencias de temperatura de las máquinas térmicas y son muy eficientes.

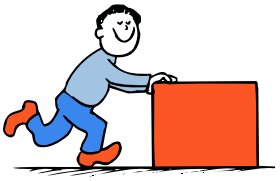


**FIGURA 18.17**
Si empujas una caja llena con refacciones de automóvil sobre un piso rugoso, todo tu trabajo se va en calentar el piso y la caja. El trabajo contra la fricción produce calor, que no puede realizar trabajo alguno sobre la caja. La energía ordenada se transforma en energía desordenada.

de nuevo, como impulsar otro motor de automóvil. El calor, disperso en el ambiente como energía térmica, es el cementerio de la energía útil.

La calidad de la energía se reduce con cada transformación, pues la energía de una forma organizada tiende a degradarse en formas desorganizadas. Con esta perspectiva más amplia, la segunda ley puede enunciarse de otra forma:

**En los procesos naturales, la energía de alta calidad tiende a transformarse en energía de menor calidad: el orden tiende hacia el desorden.**

Piensa en un sistema que consiste en una pila de monedas sobre una mesa, todas con cara arriba. Alguien camina por ahí y de manera accidental choca con la mesa y las monedas caen al suelo, seguramente no todas cara arriba. El orden se convierte en desorden. Las moléculas de gas que se mueven todas en armonía constituyen un estado ordenado, y también un estado improbable. Por otra parte, las moléculas de gas que se mueven en direcciones azarosas con un amplio rango de rapideces constituyen un estado caótico desordenado (y más probable). Si retiras la tapa de una botella de perfume o abres la puerta del horno donde hay una charola con galletas de chocolate horneadas, las moléculas escapan a la habitación y constituyen un estado más desordenado. El orden relativo se convierte en desorden. No esperarías que lo contrario sucediera por sí solo; esto es: no esperarías que las moléculas del perfume o las galletas se ordenaran solas de manera espontánea de vuelta en la botella o la charola y, por tanto, regresaran al estado más ordenado.

Los procesos en los que el desorden regresa al orden sin ninguna ayuda externa no ocurren en la naturaleza. Es interesante que al tiempo se le asigne una dirección con esta regla termodinámica. La flecha del tiempo siempre apunta del orden al desorden.[10]

La energía desordenada puede cambiarse a energía ordenada sólo con esfuerzo de organización o entrada de trabajo. Por ejemplo, el agua en un refrigerador se congela y se vuelve más ordenada porque se pone trabajo en el ciclo de refrigeración; el gas puede ordenarse en una pequeña región si un compresor alimentado con energía externa realiza trabajo. Los procesos en los que el efecto neto es un aumento de orden siempre necesitan una entrada externa de energía. Pero, para tales procesos, siempre hay un aumento de desorden en alguna otra parte que compensa de sobra el aumento del orden.

Los sistemas biológicos son enormemente complejos y, mientras viven, nunca alcanzan el equilibrio térmico.

**PUNTO DE CONTROL**

**En tu habitación probablemente hay unas $10^{27}$ moléculas de aire. Si todas ellas se congregaran en el lado opuesto de la habitación, podrías asfixiarte. Pero esto es improbable. ¿Tal congregación espontánea de moléculas es menos probable, más probable o de la misma probabilidad si hubiera menos moléculas en la habitación?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Menos moléculas significan mayor probabilidad de su congregación espontánea en el lado opuesto de tu habitación. La exageración hace esto creíble: si sólo hay una molécula en la habitación, hay un 50% de posibilidad de que esté en la otra mitad de la habitación. Si tienes dos moléculas, las posibilidades de que ambas estén en un lado al mismo tiempo es 25%. Si hay tres moléculas, la posibilidad de que te quedes sin respiración es de un octavo (12.5%). Cuanto mayor sea el número de moléculas, mayores son las posibilidades de que haya casi igual número de moléculas en ambos lados de la habitación.

Los tiburones dependen de un gel bajo su piel que detecta cambios extremadamente pequeños en la temperatura del océano: menos de una milésima de grado Celsius. Es muy probable que esta habilidad les ayude a detectar sutiles fronteras de temperatura donde se encuentran sus presas.

[10]Los sistemas reversibles parecen razonables cuando ves una película que se corre hacia atrás. ¿Recuerdas aquellas películas antiguas donde un tren se detiene a pulgadas de la heroína amarrada a las vías? ¿Cómo se hizo esto sin accidentes? Sencillo. El tren comenzó en el reposo, a pulgadas de la heroína, y corrió *hacia atrás*, adquiriendo rapidez. Cuando la película se invierte, se ve que el tren se mueve *hacia* la heroína. ¡Observa con detenimiento el humo delator que *entra* en la chimenea!

## 18.8 Entropía

La energía tiende a dispersarse: el aire caliente de un horno caliente se dispersa cuando se abre la puerta del horno. La energía tiende a degradarse: la energía encerrada en los enlaces químicos de la madera se degrada cuando la madera se quema. **Entropía** es el término que se usa para describir la dispersión o degradación natural de la energía. La entropía puede medirse por la *cantidad de desorden* de un sistema.[11] Más entropía significa más dispersión o más degradación de energía. Dado que la energía tiende a dispersarse y degradarse con el tiempo, la cantidad total de entropía en cualquier sistema tiende a aumentar con el tiempo. Siempre que a un sistema físico se le permita distribuir su energía en forma libre, siempre lo hará en una forma tal que la entropía aumente mientras disminuya la energía restante del sistema disponible para realizar trabajo.

**FIGURA 18.18**
Entropía.

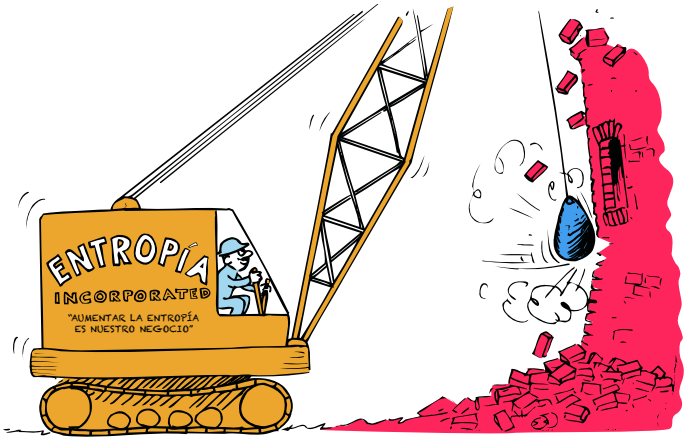



**FIGURA 18.19**
¿Por qué el lema de este contratista ("aumentar la entropía es nuestro negocio") es tan apropiado?

La entropía neta del Universo aumenta de manera continua (continuamente corre "colina abajo"). Se dice *neta* porque hay algunas regiones en las que la energía en realidad se organiza y concentra. Esto ocurre en los organismos vivos, que sobreviven al concentrar y organizar la energía de las fuentes de alimentos. Todos los organismos vivos, desde bacterias hasta árboles y seres humanos, extraen energía de sus alrededores y la utilizan para aumentar su propia organización (crecimiento y reparación). En los organismos vivos, la entropía disminuye. Pero el orden en las formas de vida se mantiene al aumentar la entropía en alguna otra parte, lo que resulta en un aumento neto de la entropía. La energía debe transformarse en los sistemas vivos para sostener la vida. Cuando no lo hace, el organismo muere pronto y tiende hacia el desorden.[12]

La primera ley de la termodinámica es una ley universal de la naturaleza a la que no se han observado excepciones. Sin embargo, la segunda ley es un enunciado probabilístico. Con suficiente tiempo, incluso los estados más improbables pueden ocurrir; en ocasiones puede disminuir la entropía. Por ejemplo, los movimientos azarosos de las moléculas del aire podrían volverse, por un momento, armoniosos en una esquina de la habitación, tal como una pila alta de monedas derramadas sobre el suelo podrían todas caer en cara. Estas situaciones son posibles, pero no son probables. La segunda ley manifiesta el curso más probable de los eventos, no el único posible.

Viejo acertijo: "¿Cómo regresarías a su forma original un huevo revuelto?" Respuesta: "Dáselo de comer a un pollo". Pero incluso entonces no obtendrías de vuelta el huevo original. La elaboración de huevos requiere energía y aumenta la entropía.

[11]La entropía puede expresarse matemáticamente. El aumento de entropía $\Delta S$ de un sistema termodinámico es igual a la cantidad de calor agregado al sistema $\Delta Q$ dividido entre la temperatura $T$ a la que se agrega calor: $\Delta S = \Delta Q/T$.

[12]Es muy interesante que el escritor estadounidense Ralph Waldo Emerson, quien vivió durante la época en la cual la segunda ley de la termodinámica era el nuevo tema científico del día, especulara filosóficamente que no todo se vuelve más desordenado con el tiempo y citó el ejemplo del pensamiento humano. Las ideas sobre la naturaleza de las cosas se perfeccionan cada vez más y se organizan mejor a medida que pasan por las mentes de las generaciones siguientes. El pensamiento humano evoluciona hacia más orden.

Con frecuencia, las leyes de la termodinámica se enuncian de esta forma: no puedes ganar (porque no puedes obtener más energía de un sistema de la que pones en él), no puedes empatar (porque no puedes obtener tanta energía útil como la que pones) y no puedes salir del juego (la entropía en el universo siempre aumenta).

Una *tercera ley de la termodinámica* afirma que ningún sistema puede reducir su temperatura absoluta a cero. Una y otra vez los investigadores han intentado alcanzar esta temperatura huidiza, acercándose mucho, pero sólo acercándose. También existe una *ley cero de la termodinámica*, que afirma que dos sistemas, cada uno en equilibrio térmico con un tercer sistema, están en equilibrio uno con otro. La importancia de esta ley se reconoció sólo después de nombrar la primera, segunda y tercera leyes, de ahí que pareció adecuado el encantador nombre de "cero".

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Termodinámica.** El estudio del calor y su transformación en diferentes formas de energía.

**Cero absoluto.** La temperatura más baja posible que puede tener una sustancia; temperatura a cual las partículas de una sustancia tienen su mínima energía cinética.

**Energía interna.** La energía total (cinética más potencial) de las partículas submicroscópicas que constituyen una sustancia. Los *cambios* de energía interna son de principal preocupación en termodinámica.

**Primera ley de la termodinámica.** Un replanteamiento de la ley de conservación de la energía, aplicada a sistemas en los que la energía se transfiere por calor y/o trabajo. El calor agregado a un sistema es igual a su aumento de energía interna más el trabajo externo que realiza sobre su ambiente.

**Proceso adiabático.** Proceso, con frecuencia expansión o compresión rápidas, en el que no entra o sale calor de un sistema.

**Inversión de temperatura.** Condición en la que cesa la convección ascendente del aire, con frecuencia debido a que una región superior de la atmósfera está más caliente que la región bajo ella.

**Segunda ley de la termodinámica.** La energía térmica nunca fluye de forma espontánea de un objeto frío a un objeto caliente. Además, ninguna máquina puede ser completamente eficiente al convertir calor a trabajo; parte del calor suministrado a la máquina con temperatura alta se disipa como calor de desecho a una temperatura más baja. Y, al final, todos los sistemas tienden a volverse cada vez más desordenados con el tiempo.

**Máquina térmica.** Dispositivo que utiliza calor como entrada y suministra trabajo como salida.

**Entropía.** Medida del desorden de un sistema. Siempre que la energía se transforma de manera libre de una forma a otra, la dirección de transformación es hacia un estado de mayor desorden y, por tanto, hacia uno de mayor entropía.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 18.1 Termodinámica

1. ¿Cuál es el origen y significado de la palabra *termodinámica*?
2. ¿El estudio de la termodinámica se ocupa principalmente de los procesos microscópicos o de los macroscópicos?

### 18.2 El cero absoluto

3. ¿En cuánto se contrae el volumen de un gas a 0°C por cada disminución en temperatura de 1 grado Celsius cuando la presión se mantiene constante?
4. ¿En cuánto disminuye la presión de gas a 0°C por cada disminución en temperatura de 1 grado Celsius cuando el volumen se mantiene constante?
5. Si supones que el gas no se condensa a líquido, ¿a qué volumen se aproxima un gas a 0°C enfriado en 273 grados Celsius?
6. ¿Cuál es la menor temperatura posible en la escala Celsius? ¿En la escala Kelvin?
7. ¿La principal preocupación en el estudio de la termodinámica es la *cantidad* de energía interna de un sistema o los *cambios* de energía interna en una sustancia?

### 18.3 La primera ley de la termodinámica

8. ¿Cuál es la relación entre la ley de conservación de la energía y la primera ley de la termodinámica?
9. ¿Qué se entiende por *sistema*?
10. ¿Cuál es la relación entre el calor agregado a un sistema, el cambio en la energía interna de un sistema y el trabajo externo realizado por el sistema?
11. ¿Qué ocurre con la energía interna de un sistema cuando sobre él se realiza trabajo mecánico? ¿Qué ocurre con su temperatura?

### 18.4 Procesos adiabáticos

12. ¿Qué condición es necesaria para que un proceso sea adiabático?
13. Si se realiza trabajo *sobre* un sistema, ¿la energía interna del sistema aumenta o disminuye? Si el trabajo es realizado *por* un sistema, ¿la energía interna del sistema aumenta o disminuye?

### 18.5 La meteorología y la primera ley

14. ¿Cómo expresan los meteorólogos la primera ley de la termodinámica?
15. ¿Cuál es la forma adiabática de la primera ley?
16. ¿Qué ocurre generalmente con la temperatura del aire que asciende? ¿Del aire que baja?
17. ¿Qué es la inversión de temperatura?
18. ¿Los procesos adiabáticos se aplican sólo a los gases? Defiende tu respuesta.

### 18.6 La segunda ley de la termodinámica

19. ¿Cómo se relaciona la segunda ley de la termodinámica con la dirección del flujo de calor?
20. ¿Cuáles tres procesos ocurren en toda máquina térmica?
21. ¿Qué es exactamente la contaminación térmica?
22. ¿Cómo se relaciona la segunda ley con las máquinas térmicas?
23. ¿Por qué es tan esencial la parte de condensación del ciclo en una turbina de vapor?

### 18.7 La energía tiende a dispersarse

24. Distingue entre energía de alta calidad y energía de baja calidad en términos de energía organizada y desorganizada. Ofrece un ejemplo de cada una.
25. ¿Cómo puede enunciarse la segunda ley con respecto a las energías de alta calidad y de baja calidad?
26. Con respecto a los estados ordenados y desordenados, ¿qué tienden a hacer los sistemas naturales? ¿Un estado desordenado alguna vez puede transformarse en un estado ordenado? Explica.

### 18.8 Entropía

27. ¿Cuál es el término de un físico para *medida de cantidad de desorden*?
28. Distingue entre la primera y la segunda leyes de la termodinámica en términos de si ocurren o no excepciones.
29. ¿Cuál es la tercera ley de la termodinámica?
30. ¿Cuál es la ley cero de la termodinámica?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

31. Realiza la actividad del recuadro "¡Escenificación de la termodinámica!" Demuestra que el agua del plato no debe estar fría para que la lata colapse. Prueba con agua caliente (pero no hirviendo) y verás colapso. ¡Impresiona a tus amigos con esto!
32. Con un martillo, clava un clavo en un trozo de madera. ¡Saca el clavo rápidamente y siente su calor! ¡El Piensa y resuelve número 41 lleva esto un paso adelante!

## SUSTITUYE Y LISTO (FAMILIARIZACIÓN CON ECUACIONES)

$$\text{Eficiencia ideal} = \frac{T_{\text{caliente}} - T_{\text{fría}}}{T_{\text{caliente}}}$$

33. Demuestra que la eficiencia ideal es 90% para una máquina en la que el combustible se calienta a 3,000 K y el aire circundante está a 300 K.
34. Calcula la eficiencia ideal de una máquina en la que el combustible se calienta a 2,700 K y el aire circundante está a 200 K.

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

35. ¿Cuál es la eficiencia ideal de un motor de automóvil que funciona entre las temperaturas 600 y 320°C? (¿Por qué tu respuesta *no* es 47%?)
36. Considera una planta eléctrica de conversión de energía térmica oceánica (OTEC, por sus siglas en inglés) que funciona sobre una diferencia de temperatura entre agua profunda a 4°C y agua superficial a 25°C. Demuestra que la eficiencia de Carnot de esta planta es 7%.
37. En un frío día a 10°C, tu amiga, quien adora el clima frío, dice que le gustaría que hiciera el doble de frío. Si tomas esto literalmente, demuestra que la temperatura que desea sería −131.5°C.
38. Imagina una gigantesca bolsa de tintorería llena de aire a una temperatura de −35°C flotando como un globo con una cuerda que cuelga de ella 10 km sobre el suelo. Estima cuál sería su temperatura si pudieras jalarla súbitamente de vuelta a la superficie de la Tierra.
39. Wally Majareta afirma haber inventado una máquina térmica que revolucionará la industria. Funciona entre una fuente caliente a 300°C y un sumidero frío a 25°C. Afirma que su máquina es 92% eficiente.
    a. ¿Qué error cometió en su elección de escalas de temperatura?
    b. ¿Cuál es la eficiencia máxima real de su máquina?
40. Una estación eléctrica, con una eficiencia de 0.4, genera $10^8$ W de energía eléctrica y disipa $1.5 \times 10^8$ J de energía térmica cada segundo hacia el agua de enfriamiento que fluye por ella, lo que aumenta su temperatura en 3 grados Celsius. Al saber que el calor específico del agua en unidades SI es 4,184 J/kg·°C, demuestra que 12,000 kg de agua calentada fluyen por la planta cada segundo.

41. Considera un clavo de acero de 6.0 g y 8.0 cm de largo, y un martillo que ejerce una fuerza promedio de 600 N sobre el clavo cuando lo clava en un trozo de madera. El clavo se calienta más. Demuestra que el aumento de temperatura del clavo es 17.8°C. (Supón que la capacidad calorífica específica del acero es 450 J/kg·°C.)
42. Construye una tabla de todas las posibles combinaciones de números que puedan salir cuando lanzas dos dados. Tu amigo dice: "sí, sé que 7 es el número total más probable cuando lanzas dos dados. ¿Pero *por qué* 7?" Con base en tu tabla, responde a tu amigo y explícale que, en termodinámica, las situaciones que son probables de observar son aquellas que pueden formarse en el mayor número de modos.

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

43. Un amigo dice que la temperatura dentro de un horno particular es 500 y la temperatura dentro de una estrella particular es 50,000. Tú no estás seguro de si tu amigo se refiere a grados Celsius o kelvins. ¿Cuánta diferencia hace esto en cada caso?
44. La temperatura del interior del Sol es de unos $10^7$ grados. ¿Importa si esto es grados Celsius o kelvins? Explica.
45. Cuando el calor fluye desde un objeto caliente en contacto con un objeto frío, ¿ambos objetos experimentan la misma cantidad de cambio de temperatura?
46. Piensa en un frasco de helio con una temperatura de 0°C. ¿Cuál será su temperatura si está el doble de caliente (tiene el doble de energía interna)?
47. Si agitas vigorosamente una lata de caldo de pollo durante más de un minuto, ¿la temperatura del caldo aumentará? (Inténtalo y observa.)
48. Cuando el aire se comprime con rapidez, ¿por qué aumenta su temperatura?
49. Supón que realizas 100 J de trabajo al comprimir un gas. Si en el proceso escapan 80 J de calor, ¿cuál es el cambio en la energía interna del gas?
50. ¿Por qué el fondo de una bomba de neumáticos se siente caliente cuando bombeas aire en el neumático, pero cuando se libera aire, la válvula se siente fría?
51. Cuando inflas un globo, ¿calientas un poco el globo? Cuando dejas salir aire de él, ¿cómo, si acaso, cambia la temperatura del aire en expansión?
52. ¿Qué ocurre con la presión del gas en el interior de una lata de galón sellada cuando se calienta? ¿Cuando se enfría? ¿Por qué?
53. ¿Por qué el aire frío de montaña se calienta cuando desciende hacia un valle?
54. ¿Cuál es la fuente final de la energía en el carbón, el petróleo y la madera? ¿Por qué a la energía de la madera se le llama renovable pero a la energía del carbón y el petróleo, no renovable?
55. ¿Cuál es la fuente final de la energía en una planta hidroeléctrica?
56. ¿Por qué es conveniente usar vapor tan caliente como sea posible en una turbina impulsada por vapor?
57. ¿Cómo se relaciona la eficiencia ideal de un automóvil con la temperatura del motor y la temperatura del ambiente en el que funciona? Sé específico.
58. ¿Qué ocurre con la eficiencia de una máquina térmica cuando baja la temperatura del depósito hacia el cual se transfiere energía térmica?
59. ¿Bajo qué condiciones una máquina térmica sería 100% eficiente?
60. Para aumentar la eficiencia de una máquina térmica, ¿sería preferible producir el mismo incremento de temperatura al aumentar la temperatura del depósito mientras se mantiene constante la temperatura del sumidero, o disminuir la temperatura del sumidero mientras se mantiene constante la temperatura del depósito? Explica.
61. ¿Podrías enfriar una cocina si dejas abierta la puerta del refrigerador y cierras la puerta y las ventanas de la cocina? Explica.
62. ¿Podrías calentar una cocina si dejas abierta la puerta de un horno caliente? Explica.
63. Un ventilador eléctrico no sólo no reduce la temperatura del aire, sino que en realidad aumenta la temperatura del aire. ¿Cómo, entonces, te enfrías con un ventilador en un día caluroso?
64. Estrictamente hablando, ¿por qué un refrigerador que contiene una cantidad fija de alimentos consumirá más energía en una habitación caliente que en una habitación fría?
65. Un refrigerador mueve calor de frío a caliente. ¿Por qué esto no viola la segunda ley de la termodinámica?
66. ¿Qué ocurre con la densidad de una cantidad de gas cuando su temperatura disminuye y su presión se mantiene constante?
67. Si oprimes un globo lleno de aire y no escapa calor, ¿qué ocurre con la energía interna del gas en el globo?
68. En los edificios que se calientan eléctricamente, ¿es un completo despilfarro encender todas las luces? ¿Es un desperdicio encender todas las luces si el edificio se enfría con acondicionadores de aire?
69. ¿Por qué el pájaro bebedor de la Figura 17.4 del Capítulo 17 puede considerarse una máquina térmica?
70. Las moléculas en la cámara de combustión del motor de un cohete están en un alto estado de movimiento aleatorio. Cuando las moléculas se expulsan por la tobera en un estado más ordenado, ¿su temperatura será mayor, menor o la misma que su temperatura inicial en la cámara antes de ser expulsadas?
71. ¿La energía total del Universo se vuelve más indisponible con el tiempo? Explica.
72. De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, ¿el Universo se mueve hacia un estado más ordenado o hacia un estado más desordenado?
73. ¿Las parcelas adiabáticas ocurren en la atmósfera, en el océano o en ambos?

74. El océano posee enormes cantidades de moléculas, todas con energía cinética. ¿Esta energía puede extraerse y aprovecharse como fuente de electricidad? Defiende tu respuesta.
75. ¿Por qué se dice que una sustancia en una fase líquida está más desordenada que la misma sustancia en una fase sólida?
76. El agua se evapora de una solución salina y deja detrás cristales de sal que tienen un mayor grado de orden molecular que las moléculas con movimiento más aleatorio en el agua salada. ¿Se viola el principio de entropía? ¿Por qué sí o por qué no?
77. El agua que pones en el compartimiento del congelador de tu refrigerador pasa a un estado de menos desorden molecular cuando se congela. ¿Ésta es una excepción al principio de entropía? Explica.
78. Conforme un pollo se desarrolla a partir de un huevo, se vuelve más ordenado con el tiempo. ¿Esto viola el principio de entropía? Explica.
79. La Oficina de Patentes y Marcas de Estados Unidos rechaza las afirmaciones de máquinas de movimiento perpetuo (en las cuales la energía de salida es tan grande o mayor que la energía de entrada) sin siquiera investigarlas. ¿Por qué hace esto?

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

80. Discute si es posible convertir totalmente una cantidad dada de energía mecánica en energía térmica. ¿Es posible convertir en su totalidad una cantidad dada de energía térmica en energía mecánica? Cita ejemplos que ilustren tus respuestas.
81. El calor siempre fluye de manera espontánea de un objeto con una temperatura más alta hacia un objeto con una temperatura más baja. ¿Esto es lo mismo que decir que el calor siempre fluye de un objeto con mayor energía interna hacia uno con menor energía interna? Discute por qué sí o por qué no.
82. Todos saben que el aire caliente sube. Así que puede parecer que la temperatura del aire debería ser mayor en las cimas de las montañas que colina abajo. Discute por qué lo opuesto es lo más frecuente.
83. Sobre la superficie de tu piel flota una capa de aire de unos 3 milímetros de grosor que actúa como cobija térmica. En un día caluroso, ¿qué efecto tiene una brisa sobre tu piel desnuda? ¿Qué efecto tiene en un día frío?
84. Tu corazón es una bomba que suministra sangre a todas las partes de tu cuerpo, incluido tu cerebro. El movimiento de las partículas en el cerebro, como en cualquier dispositivo, genera calor. ¿Qué sugiere esto acerca de las temperaturas de la sangre que entra a tu cerebro y la sangre que sale de tu cerebro (y por qué esto puede afectar la concentración)?
85. La temperatura en Boston era de 40°F cuando era de 80°F en San Petersburgo, FL. ¿Cuál es tu respuesta a un amigo quien sugiere que en San Petersburgo hacía el doble de calor ese día?
86. Las energías cinéticas moleculares combinadas de las moléculas en un lago frío son mayores que las energías cinéticas moleculares combinadas de las moléculas en una taza de té caliente. Supón que sumerges parcialmente la taza de té en el lago y que el té *absorbe* 10 calorías del agua y se calienta más, en tanto que el agua que cede 10 calorías se enfría más. ¿Esta transferencia de energía violaría la primera ley de la termodinámica? ¿La segunda ley de la termodinámica? Discute tus respuestas.
87. ¿Por qué la contaminación térmica es un término relativo?
88. El recuadro "¡Escenificación de la termodinámica!" muestra cómo se aplasta una lata llena de vapor invertida sobre un plato con agua. ¿El agua necesita estar fría? ¿Ocurriría aplastamiento si el agua estuviera caliente mas no en ebullición? ¿La lata se aplastaría en agua hirviendo? Discute esto, ¡y luego inténtalo y observa!
89. Defiende la afirmación de que 100% de la energía eléctrica que se usa para iluminar una lámpara se convierte en energía térmica. ¿Se violan la primera y segunda leyes de la termodinámica?
90. Discute este enunciado: la segunda ley de la termodinámica es una de las leyes más fundamentales de la naturaleza, aunque no sea una ley exacta en absoluto. ¿Por qué no?
91. Por lo general se supone que las máquinas de movimiento perpetuo son imposibles de construir. ¿Es incongruente decir que las moléculas están en movimiento perpetuo?
92. Un compañero de clase dice que todo este asunto del movimiento perpetuo es una patraña; que átomos, planetas, estrellas y todo está en movimiento perpetuo. ¿Qué distinción falta aquí?
93. (a) Si pasas 10 minutos agitando en forma repetida y lanzando un par de monedas, ¿esperarías ver dos caras salir al menos una vez? (b) Si pasas una hora agitando un puñado de 10 monedas y lanzándolas al suelo, ¿esperarías ver a las 10 salir con cara al menos una vez? (c) Si agitas una caja con 10,000 monedas y las lanzas repetidamente al suelo todo el día, ¿esperarías ver a las 10,000 aparecer con cara al menos una vez? Discute.

# PARTE TRES Examen de práctica de opción múltiple

*Elige la MEJOR respuesta a cada una de las siguientes:*

1. Por lo general, la temperatura es proporcional a la _____ de una sustancia.
   (a) energía térmica
   (b) energía cinética de vibración
   (c) energía cinética traslacional promedio
   (d) energía cinética rotacional
2. El calor es simplemente otra palabra para
   (a) temperatura.
   (b) energía interna.
   (c) energía interna que fluye de caliente a frío.
   (d) energía radiante.
3. ¿Cuál de estas temperaturas es probable cuando un recipiente con agua a 20°C se mezcla con agua a 28°C?
   (a) 19°C. (c) 30°C.
   (b) 22°C. (d) Mayor que 30°C.
4. La cantidad de calor transferido a un sistema puede medirse en
   (a) calorías. (c) Cualquiera de ellos.
   (b) joules. (d) Ninguno de ellos.
5. La arena caliente se enfría más rápido en la noche que la vegetación. Comparada con la vegetación, la capacidad calorífica específica de la arena es
   (a) menor. (c) aproximadamente la misma.
   (b) mayor. (d) No se puede decir.
6. Cuando la temperatura de una tira de hierro aumenta, la longitud de la tira
   (a) también aumenta.
   (b) en realidad disminuye.
   (c) puede aumentar y puede disminuir.
   (d) disminuye en ancho a medida que se alarga.
7. El cieno microscópico en el agua tiende a hacer al agua
   (a) más densa. (c) más resbalosa.
   (b) menos densa. (d) más caliente.
8. La principal fuente de energía interna de la Tierra es
   (a) la fricción de las mareas. (c) la radiactividad.
   (b) la presión gravitacional. (d) el calor geotérmico.
9. La superficie del planeta Tierra pierde energía hacia el espacio exterior debido principalmente a
   (a) conducción. (c) radiación.
   (b) convección. (d) radiactividad.
10. Los gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global son
    (a) vapor de agua. (c) Ambos.
    (b) dióxido de carbono. (d) Ninguno.
11. En una mezcla de gases hidrógeno, oxígeno y nitrógeno a una temperatura dada, las moléculas más rápidas en promedio son las de
    (a) hidrógeno. (c) nitrógeno.
    (b) oxígeno. (d) Todas tienen la misma rapidez promedio.
12. La conducción térmica involucra principalmente
    (a) electrones. (c) neutrones.
    (b) protones. (d) iones.
13. La convección térmica involucra principalmente
    (a) energía radiante. (c) aislantes.
    (b) fluidos. (d) Todo esto.
14. El calor viaja del Sol a la Tierra por el proceso de
    (a) conducción. (c) radiación.
    (b) convección. (d) Todo esto, aunque la radiación es mayor.
15. Una fuente a temperatura alta radia relativamente
    (a) longitudes de onda corta. (c) frecuencias bajas de radiación.
    (b) longitudes de onda larga. (d) Ninguna de éstas.
16. Un objeto que absorbe bien energía también
    (a) conduce bien. (c) radia bien.
    (b) tiene buena convección. (d) Ninguno de éstos.
17. La ley de enfriamiento de Newton se aplica a objetos que
    (a) se enfrían. (c) Ambos.
    (b) se calientan. (d) Ninguno.
18. Comparada con la radiación proveniente del Sol, la radiación terrestre tiene una más baja
    (a) longitud de onda. (c) Ambos.
    (b) frecuencia. (d) Ninguno.
19. Cuando moléculas con movimiento relativamente lento se condensan del aire, la temperatura del aire restante tiende a
    (a) permanecer invariable. (c) aumentar.
    (b) disminuir. (d) dispersarse de manera uniforme.
20. Pon una cacerola con agua sobre tu mesa. Un proceso que ocurre entonces es
    (a) evaporación. (c) Ambos.
    (b) condensación. (d) Ninguno.
21. El proceso de hervir el agua tiende a
    (a) calentar el agua. (c) Ambos.
    (b) enfriar el agua. (d) Ninguno.
22. Ebullición y congelación ocurren cuando el agua se sujeta a
    (a) temperaturas reducidas.
    (b) presión atmosférica reducida.
    (c) temperaturas aumentadas.
    (d) presión atmosférica aumentada.
23. El rehielo ocurre debido a _____ del agua.
    (a) el alto calor específico
    (b) los cristales de hielo de estructura abierta
    (c) la alta tasa de expansión
    (d) la leve tendencia a congelarse cuando la temperatura se reduce
24. Cuando el agua cambia a vapor, la energía se
    (a) absorbe por el agua.
    (b) libera por el agua.
    (c) conserva a medida que ocurre el cambio de fase.
    (d) cambia a una forma diferente.
25. La temperatura más baja posible es el cero absoluto a
    (a) 0 kelvin. (c) Ambos son lo mismo.
    (b) –273°C. (d) Ninguno de ellos.
26. Cuando respiras sobre tu mano, la temperatura del aire exhalado que llega a tu mano
    (a) aumenta. (c) permanece invariable.
    (b) disminuye. (d) depende de cómo soples.
27. La segunda ley de la termodinámica dice que el calor no fluye de
    (a) caliente a frío jamás.
    (b) frío a caliente jamás.
    (c) caliente a frío sin energía externa.
    (d) frío a caliente sin energía externa.
28. Las máquinas térmicas, como un motor jet, son más eficientes cuando funcionan a
    (a) temperaturas altas. (c) temperaturas bajas.
    (b) temperaturas constantes. (d) una tasa constante.
29. La dirección de los procesos naturales es de estados de
    (a) mayor orden a menor orden.
    (b) menor orden a mayor orden.
    (c) desorganización a organización.
    (d) desorden a equilibrio.
30. A medida que aumenta la entropía de un sistema, la energía en el sistema
    (a) se vuelve más ordenada.
    (b) se vuelve menos ordenada.
    (c) alcanza el equilibrio.
    (d) se mueve hacia la destrucción.

*Después* de hacer elecciones razonadas, y discutirlas con tus amigos, encuentra las respuestas en la página S-1.

PARTE CUATRO

# Sonido

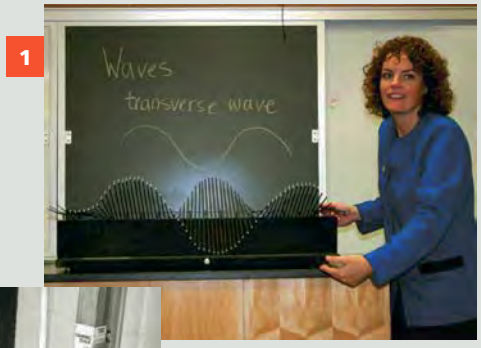
Las cerdas de mi arco frotan contra las cuerdas del cello y las ponen a vibrar a una frecuencia que depende de su masa, tensión y la parte que puedo controlar con mis dedos, que es su longitud. La vibración de las cuerdas fuerza con suavidad vibraciones de frecuencias iguales en el cuerpo de madera, y las vibraciones no paran ahí. La vibración de la madera produce vibraciones en el aire circundante que transporta el sonido de la música hacia los tímpanos de mis escuchas. ¡Es exquisita la física de la música!

19

CAPÍTULO 19

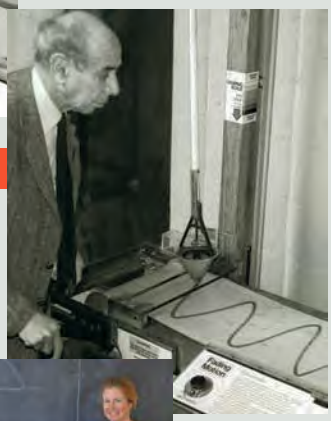
# Vibraciones y ondas


19.1 Buenas vibraciones
19.2 Descripción de ondas
19.3 Movimiento ondulatorio
19.4 Rapidez de ondas
19.5 Interferencia de ondas
19.6 Efecto Doppler
19.7 Ondas de proa
19.8 Ondas de choque

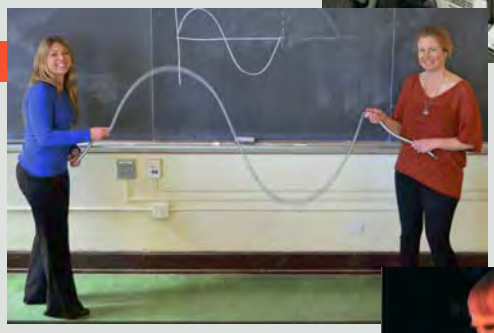




1

2



3



4

5

**1** Diane Reindeau muestra a sus alumnos cómo se generan ondas mediante vibraciones en un demostrador de ondas didáctico. **2** Frank Oppenheimer, en el Exploratorium de San Francisco, muestra el rastro en línea recta que deja la lenteja de un péndulo que se balancea y suelta arena sobre una banda transportadora estacionaria. **3** Cuando la banda transportadora se mueve con movimiento uniforme, se traza una curva sinusoidal. **4** Jill Johnsen y Diane Lininger Markham producen ondas transversales. **5** Cantor, compositor y profesor de química, John Suchocki produce vibraciones armoniosas.

El Exploratorium de San Francisco no sólo es un museo de ciencia y tecnología de clase mundial, también es quizás el mejor lugar del planeta Tierra para impartir una clase de física. Tuve el honor de hacer esto en los años 1982-2000. El Exploratorium es especial gracias a su fundador, Frank Oppenheimer, el hermano menor del más famoso J. Robert Oppenheimer, director del laboratorio Los Álamos durante la Segunda Guerra Mundial. La pasión de Frank por hacer física sólo es superada por la pasión con que la enseña. Tuve el enorme privilegio de compartir mi salón de clase con él con el tema de vibraciones, ondas y sonidos musicales. Recuerdo que, después de una de sus brillantes presentaciones, me preguntó con discreción qué me había parecido. Casi con llanto le respondí: "Estuviste magnífico". Porque era verdad. Además de sus grandiosas explicaciones de la física, él mismo emanaba una grandeza personal: con su insistencia en la excelencia, su falta de pretensión y su respeto por la inventiva y el juego, y por sus estudiantes. En mi experiencia, Frank fue un profesor muy querido.

Frank Oppenheimer fue víctima de la persecución política de la década de 1950, cuando admitió pertenecer al Partido Comunista de Estados Unidos durante lo más profundo de la Gran Depresión, junto con muchos otros ciudadanos idealistas que eran conscientes de la alta tasa de desempleo de la nación durante aquella época. Frank me dijo que, después de rehusarse a dar los nombres de otros miembros al Comité de Actividades Internas Antiestadounidenses, fue acosado por el FBI. A pesar de sus impresionantes logros en física y a pesar de los premios internacionales de física que recibió, a Frank se le prohibió practicarla. Sin embargo, se le permitió cuidar ganado e impartir ciencia general en la Pagosa Springs High School, en Colorado. Frank también dijo que, por si fuera poco, agentes del gobierno advirtieron a sus vecinos que vigilaran sus potenciales "actividades antiestadounidenses".

Frank dedicó el resto de su vida a exponer al público general las maravillas de la ciencia, lo que culminó en el Exploratorium de San Francisco. A él dediqué la quinta edición de mi *Física conceptual*. Antes de su muerte, en 1985, Frank aportó este texto, que utilicé como párrafo de apertura del libro:

> "Cuando tratamos de entender el mundo natural que nos rodea, ganamos confianza en nuestra capacidad de decidir en quién confiar y también en qué creer sobre otros temas. Sin esta confianza, será inevitable que las decisiones que tomemos sobre asuntos sociales, políticos y económicos se basen por completo en una muy atractiva mentira que alguien más nos diga. Por tanto, valorar las observaciones y descubrimientos tanto de científicos como de artistas sirve no sólo para nuestro deleite, sino también para ayudarnos a tomar decisiones más satisfactorias y válidas, y para encontrar mejores soluciones a nuestros problemas individuales y sociales."

El motivo principal de Frank para fundar el Exploratorium fue estimular a las personas y motivarlas a hacer las cosas por ellas mismas y a pensar por ellas mismas, una forma de enseñar que ahora está muy difundida. En 2013, el Exploratorium se mudó del Palace of Fine Arts en San Francisco, al cercano Pier 15. Me da mucho gusto anunciar que el nuevo y más grande Exploratorium tiene todo el encanto y la buena energía que Frank otorgó al Exploratorium original.

## 19.1 Buenas vibraciones

En un sentido general, todo lo que se mueve de ida y vuelta, atrás y adelante, de lado a lado, adentro y afuera, o arriba y abajo, está vibrando. Una *vibración* es un meneo periódico en el tiempo. Un meneo periódico tanto en el espacio como en el tiempo es una *onda*. Una onda se extiende de un lugar a otro. La luz y el sonido son ambas vibraciones que se propagan por el espacio como ondas, pero dos tipos de ondas muy diferentes. El sonido es una onda mecánica, la propagación de la vibración a través de un medio material: un sólido, un líquido o un gas. Si no hay un medio material para vibrar, entonces el sonido no es posible. El sonido no puede viajar en el vacío. Pero la luz sí puede porque, como aprenderás en capítulos posteriores, la luz es una vibración de campos eléctricos y magnéticos: una onda electromagnética de energía pura. Si bien la luz puede pasar a través de muchos materiales, no necesita de ninguno. Esto es evidente cuando se propaga a través del vacío entre el Sol y la Tierra. La fuente de todas las ondas —mecánicas o electromagnéticas— es algo que vibra. Para comenzar el estudio de las vibraciones y las ondas se estudiará el movimiento de un péndulo simple.

**pti**

- Para saber más de Oppenheimer, lee *Something Incredibly Wonderful Happens: Frank Oppenheimer and the World He Made Up* (Algo increíblemente maravilloso sucede: Frank Oppenheimer y el mundo que construyó), de K. C. Cole (Boston: Houghton Mifflin Harcourt, 2009).

## Vibración de un péndulo

Si suspendes una piedra en el extremo de una cuerda, tienes un péndulo simple. Lo mismo sucede con un recipiente lleno de arena suspendido en el extremo de un poste vertical que se balancea de ida y vuelta. En las fotografías al inicio del capítulo, Frank Oppenheimer muestra cómo la arena que cae de un péndulo como éstos traza una línea recta sobre una banda transportadora estacionaria y, luego, cuando la banda se mueve con rapidez constante, produce una curva especial conocida como *curva sinusoidal*. Una **curva sinusoidal** es una representación gráfica de una onda producida por un movimiento armónico simple.[1]

Los péndulos se balancean de ida y vuelta con tal regularidad que, durante mucho tiempo, se utilizaron para controlar el movimiento de la mayoría de los relojes. Todavía se pueden encontrar en los relojes de pie y los relojes cucú. Galileo descubrió que el tiempo que un péndulo tarda en balancearse de ida y vuelta pequeñas distancias sólo depende de la *longitud del péndulo*.[2] El tiempo de un balanceo de ida y vuelta, llamado *periodo*, no depende ni de la masa del péndulo ni del tamaño del arco a través del que se balancea.

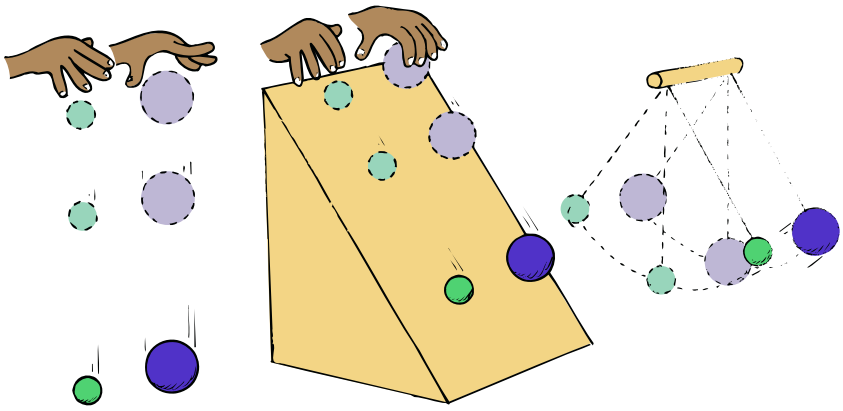


**FIGURA 19.1**
Si sueltas dos bolas de diferentes masas, aceleran a *g*. Deja que se deslicen sin fricción por un plano inclinado y se deslizan juntas a la misma fracción de *g*. Amárralas a cuerdas de la misma longitud de modo que sean péndulos, y se balancean de ida y vuelta al unísono. En todos los casos, los movimientos son independientes de la masa.

En 1848, Jean Foucault diseñó un péndulo muy largo que, cuando se balancea, parece cambiar de dirección durante el día. En realidad, la Tierra gira por debajo del péndulo.

Un péndulo largo tiene un periodo más largo que un péndulo corto; esto es: se balancea de ida y vuelta con menos frecuencia que un péndulo corto. El péndulo de un reloj de pie, con una longitud de aproximadamente 1 metro, por ejemplo, se balancea con un periodo pausado de 2 segundos, en tanto que el péndulo mucho más corto de un reloj cucú se balancea con un periodo que es de menos de un segundo. Además de la longitud, el periodo de un péndulo depende de la aceleración debida a la gravedad. Los buscadores de petróleo y minerales utilizan péndulos muy sensibles para detectar diferencias leves en esta aceleración, que es afectada por las densidades de las formaciones subterráneas.

## 19.2 Descripción de ondas

**SCREENCAST:**
**Buenas vibraciones y ondas**

Una curva sinusoidal también puede trazarse con una lenteja unida a un resorte que experimente movimiento armónico simple vertical (Figura 19.2). Como se mencionó, una curva seno es una representación gráfica de una onda. Al igual que con una onda en el agua, los puntos altos de una onda sinusoidal se llaman *crestas* y los puntos bajos

[1]La condición para el movimiento armónico simple es que la fuerza restauradora sea proporcional al desplazamiento desde el equilibrio. Esta condición se cumple, al menos de manera aproximada, en la mayoría de las vibraciones. La componente del peso que restaura un péndulo desplazado a su posición de equilibrio es directamente proporcional al desplazamiento del péndulo (en los ángulos pequeños); lo mismo sucede con una lenteja unida a un resorte. Recuerda, del Capítulo 12, que la ley de Hooke para un resorte es $F = k\Delta x$, donde la fuerza para estirar (o comprimir) un resorte es directamente proporcional a la distancia estirada (o comprimida).

[2]La ecuación para el periodo de un péndulo simple para arcos pequeños es $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$, donde $T$ es el periodo, $L$ es la longitud del péndulo y $g$ es la aceleración debida a la gravedad.

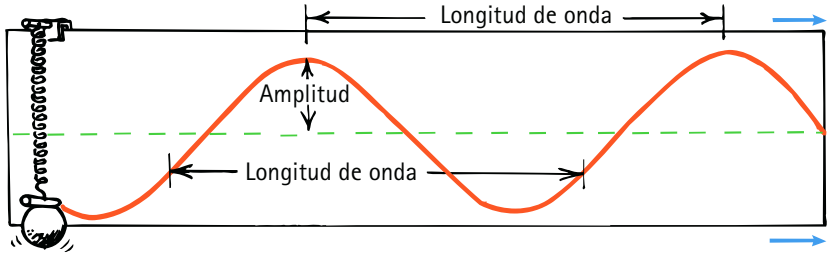



**FIGURA 19.2**
Cuando la lenteja vibra arriba y abajo, una plumilla marcadora traza una curva sinusoidal sobre el papel que se mueve horizontalmente con rapidez constante.

se llaman *valles*. La línea recta punteada en la figura representa el punto medio de la vibración, la posición de equilibrio. El término **amplitud** se refiere a la distancia entre el punto medio y la cresta (o el valle) de la onda. De modo que la amplitud es igual al desplazamiento máximo desde el equilibrio.

La **longitud de onda** de una onda es la distancia de la parte superior de una cresta a la parte superior de la siguiente cresta. O, lo que es lo mismo, la longitud de onda es la distancia entre cualesquiera partes sucesivas idénticas de la onda. Las longitudes de onda de las olas en la playa se miden en metros, las longitudes de onda de las ondulaciones en un estanque se miden en centímetros y las longitudes de onda de la luz se miden en mil millonésimas de metro (nanómetros).

Qué tan a menudo ocurre una vibración se describe mediante su **frecuencia**. La frecuencia de un péndulo que vibra, o de un objeto sobre un resorte, especifica el número de vibraciones de ida y vuelta que realiza en un tiempo dado (por lo general, 1 segundo). Una oscilación completa de ida y vuelta es una vibración. Si una vibración ocurre en 1 segundo, la frecuencia es de una vibración por segundo. Si dos vibraciones transcurren en 1 segundo, la frecuencia es de dos vibraciones por segundo.

La unidad de frecuencia se llama **hertz** (Hz), en honor a Heinrich Hertz, quien demostró las ondas de radio en 1886. Una vibración por segundo es 1 hertz, dos vibraciones por segundo es 2 hertz y así sucesivamente. Las frecuencias más altas se miden en kilohertz (kHz, miles de hertz) y las frecuencias todavía más altas en megahertz (MHz, millones de hertz) o gigahertz (GHz, miles de millones de hertz). Las ondas de radio AM se miden en kilohertz, y las ondas de radio FM se miden en megahertz; el radar y los hornos de microondas funcionan en frecuencias de gigahertz. Una estación a 960 kHz en el sintonizador de radio AM, por ejemplo, transmite ondas de radio que tienen una frecuencia de 960,000 vibraciones por segundo. Una estación a 101.7 MHz en el sintonizador FM transmite ondas de radio con una frecuencia de 101,700,000 hertz. Dichas frecuencias de ondas de radio son las frecuencias a las que los electrones se fuerzan a vibrar en la antena de la torre de transmisión de una estación de radio. Como puedes ver, la fuente de todas las ondas es algo que vibra. La frecuencia de la fuente en vibración y la frecuencia de la onda que produce son la misma.

La frecuencia de una onda "clásica" (como una onda sonora, una ola o una onda de radio) coincide con la frecuencia de su fuente de vibración. (En el mundo cuántico de los átomos y fotones, las reglas son diferentes.)

El **periodo** de una vibración u onda es el tiempo de una vibración completa. Si se conoce la frecuencia de un objeto, entonces puede calcularse su periodo, y viceversa. Supón, por ejemplo, que un péndulo realiza dos vibraciones en 1 segundo. Su frecuencia es 2 Hz. El tiempo necesario para completar una vibración —esto es: el periodo de vibración— es 1/2 segundo. O, si la frecuencia de vibración es de 3 Hz, entonces el periodo es 1/3 segundo. La frecuencia (vibraciones por segundo) y el periodo (segundos por vibración) son recíprocos:

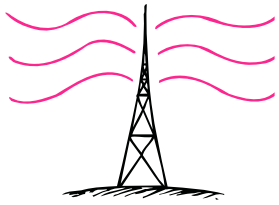


**FIGURA 19.3**
Los electrones en la antena de transmisión vibran 940,000 veces cada segundo y producen ondas de radio a 940 kHz.

$$\text{Frecuencia} = \frac{1}{\text{periodo}}$$

o, viceversa,

$$\text{Periodo} = \frac{1}{\text{frecuencia}}$$

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Un cepillo de dientes eléctrico completa 90 ciclos cada segundo. ¿Cuáles son (a) su frecuencia y (b) su periodo?**
2. **Soplan ráfagas de viento que hacen que la Torre Willis de Chicago se balancee de ida y vuelta y complete un ciclo en 10 s. ¿Cuáles son (a) su frecuencia y (b) su periodo?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

**1.** (a) 90 ciclos por segundo es 90 Hz; (b) 1/90 s.

**2.** (a) 1/10 Hz; (b) 10 s.

## 19.3 Movimiento ondulatorio

Numerosos fanáticos en un concierto o estadio "hacen la ola" al levantarse de sus asientos, balancear los brazos hacia lo alto y luego sentarse de nuevo en sus asientos... todo en una secuencia adecuada.

La mayor parte de la información de tu entorno llega en forma de ondas. Es con el movimiento de las ondas que los sonidos se transportan hasta tus oídos, la luz hasta tus ojos y las señales electromagnéticas hasta tu radio y tu teléfono inalámbrico. Mediante el *movimiento ondulatorio*, la energía puede transferirse de una fuente a un receptor sin la transferencia de materia entre los dos puntos.

Para entender mejor el movimiento ondulatorio hay que considerar primero el caso sencillo de una soga estirada en sentido horizontal. Si un extremo de dicha soga se sacude hacia arriba y hacia abajo, una perturbación rítmica viaja por toda la soga. Cada partícula de la soga se mueve hacia arriba y hacia abajo, mientras que, al mismo tiempo, la perturbación se mueve a lo largo de la longitud de la soga. El medio, la soga o lo que sea, regresa a su condición inicial después de que pasó la perturbación. Lo que se propaga es la perturbación, la *energía* del movimiento ondulatorio, no el medio en sí.

**FIGURA 19.4**
Ondas en el agua.

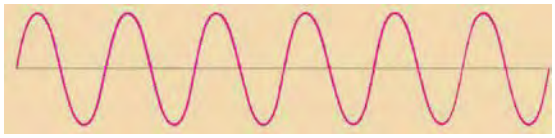
Quizás un ejemplo más familiar de movimiento ondulatorio es una onda en el agua. Si se suelta una piedra en un estanque tranquilo, las ondas viajan hacia afuera en círculos que se expanden, cuyos centros están en la fuente de la perturbación. En este caso, puedes pensar que el agua se transporta con las ondas, pues el agua se salpica hacia terreno antes seco cuando las olas llegan a la orilla. Sin embargo, debes darte cuenta de que, si encuentra obstáculos, el agua fluirá de vuelta hacia el estanque y las cosas serán en gran medida como eran al principio. La superficie del agua se perturbará, pero el agua en sí no irá a ninguna parte. Una hoja sobre la superficie se bamboleará hacia arriba y hacia abajo y se moverá de ida y vuelta, conforme la ola pase, pero la hoja terminará donde comenzó. De nuevo, el medio regresa a su condición inicial después de que pasó la perturbación, incluso en el caso extremo de un tsunami.

Las ondas mecánicas necesitan un medio. Un Slinky necesita sus espiras; las olas del océano necesitan agua; el sonido de un clarín necesita aire; "la ola" en un estadio necesita fanáticos exuberantes.

El siguiente es otro ejemplo de onda que ilustra que lo que se transporta de una posición a otra es una perturbación en un medio, no el medio en sí. Si ves un campo de pasto alto desde una posición elevada en un día ventoso, verás ondas que viajan a través del pasto. Ningún tallo del pasto abandona su lugar; más bien, todos se balancean de ida y vuelta. Es más, si estás de pie sobre un sendero estrecho, el pasto que sopla sobre el borde del sendero y cepilla tus piernas se parece mucho al agua que moja la orilla en el ejemplo anterior. Mientras continúe el movimiento ondulatorio, el pasto alto se balancea de ida y vuelta y vibra entre límites definidos, pero no va a ninguna parte. Cuando el movimiento ondulatorio se detiene, el pasto regresa a su posición inicial.

## PRACTICANDO LA FÍSICA

Aquí tienes una curva sinusoidal que representa una onda transversal. Con una regla, mide la longitud de onda y la amplitud de la onda.



Longitud de onda _____

Amplitud _____

## Ondas transversales

Amarra el extremo de una soga a una pared y sostén el extremo libre en tu mano. Si en forma súbita sacudes el extremo libre hacia arriba y hacia abajo, un pulso viajará por toda la soga y regresará (Figura 19.5). En este caso, el movimiento de la soga (flechas arriba y abajo) está en ángulos rectos con respecto a la dirección de la rapidez de la onda. El movimiento en ángulo recto, o lateral, se llama *movimiento transversal*. Ahora sacude la soga con un movimiento regular continuo hacia arriba y hacia abajo, y la serie de pulsos producirá una onda. Dado que el movimiento del medio (la soga, en este caso) es transversal a la dirección en la que viaja la onda, este tipo de onda se llama **onda transversal**.

**SCREENCAST:**
**Tipos de ondas**

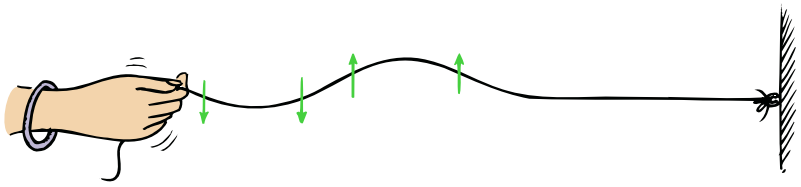


**FIGURA 19.5**
Una onda transversal.

Las ondas en las cuerdas estiradas de los instrumentos musicales son transversales. Más adelante verás que las ondas electromagnéticas, que constituyen las ondas de radio y la luz, también son transversales.

**VIDEO:**
**Ondas longitudinales y transversales**

## Ondas longitudinales

No todas las ondas son transversales. En ocasiones, las partes que constituyen un medio se mueven de ida y vuelta en la misma dirección en la que viaja la onda. El movimiento es *a lo largo* de la dirección de la onda en lugar de en ángulo recto con respecto a ella. Esto produce una **onda longitudinal**.

El sonido necesita un medio. No puede viajar en un vacío porque no hay nada que comprimir y estirar.

Tanto una onda transversal como una onda longitudinal pueden demostrarse con un resorte o un Slinky estirado, como se muestra en la Figura 19.6. Se produce una

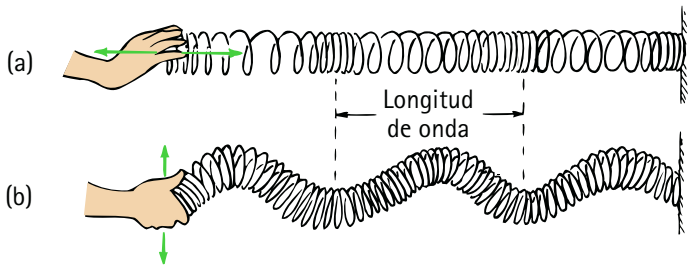



**FIGURA 19.6**
Ambas ondas transfieren energía de izquierda a derecha. (a) Cuando el extremo del Slinky se empuja y jala de manera rápida a lo largo de su longitud, se produce una onda longitudinal. (b) Cuando se sacude hacia los lados, se produce una onda transversal.

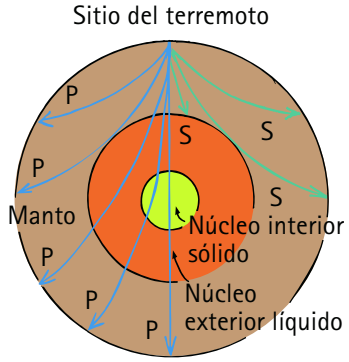



**FIGURA 19.7**
Ondas P y S generadas por un terremoto.

onda transversal cuando se sacude el extremo de un Slinky de lado a lado en una dirección perpendicular al Slinky. Se crea una onda longitudinal cuando jalas y empujas el extremo del Slinky hacia y desde ti en una dirección paralela al Slinky. En este caso, se ve que el medio vibra paralelo a la dirección de transferencia de energía. Parte del Slinky se comprime y una onda de *compresión* viaja a lo largo del resorte. Entre compresiones sucesivas hay una región estirada, llamada *rarefacción*. Tanto compresiones como rarefacciones viajan en la misma dirección por el Slinky. Las ondas sonoras son ondas longitudinales.

Las ondas generadas por los terremotos y que viajan en el suelo son de dos tipos principales: las ondas longitudinales P y las ondas transversales S. [Los estudiantes de geología con frecuencia recuerdan las ondas P como ondas "push-pull" (empujar-jalar) más rápidas y las ondas S como ondas "side-to-side" (lado a lado) más lentas.] Las ondas S no pueden viajar a través de materia líquida, pero las ondas P pueden viajar a través tanto de las partes fundidas como de las partes sólidas del interior de la Tierra. El estudio de estas ondas revela mucho del interior de la Tierra.

La longitud de onda de una onda longitudinal es la distancia entre compresiones sucesivas o, dicho de otro modo, la distancia entre rarefacciones sucesivas. El ejemplo más común de ondas longitudinales es el sonido en el aire. Los elementos del aire vibran de ida y vuelta en torno a alguna posición de equilibrio a medida que las ondas se mueven. En el Capítulo 20 se abordarán en detalle las ondas sonoras.

**pti**

- Las ondas sobre la superficie del agua son híbridos transversales longitudinales: el agua se mueve en bucles, hacia arriba y hacia abajo, así como de ida y vuelta. Y como con otras ondas, el medio no realiza un avance neto en la dirección de propagación de la onda.

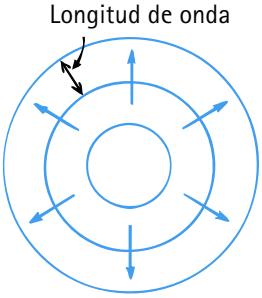



**FIGURA 19.8**
Vista superior de las ondas en el agua. Cada círculo azul representa una cresta del patrón ondulatorio que se expande. A estas líneas de cresta se les llama *frentes de onda*.

## 19.4 Rapidez de ondas

La rapidez del movimiento ondulatorio periódico se relaciona con la frecuencia y la longitud de onda de las ondas. Para entender esto, piensa que ves desde arriba el caso simple de las olas (Figura 19.8). Imagina que fijas los ojos en un punto estacionario sobre la superficie del agua y observas las olas que pasan por este punto. Puedes medir cuánto tiempo transcurre entre la llegada de una cresta y la llegada de la siguiente (el periodo) y también observar la distancia entre las crestas (la longitud de onda). Sabes que la rapidez se define como la distancia dividida entre el tiempo. En este caso, la distancia es una longitud de onda y el tiempo es un periodo, de modo que la **rapidez de onda** = longitud de onda/periodo.

Por ejemplo, si la longitud de onda es de 1.5 m y el tiempo entre crestas en un punto sobre la superficie es de 0.5 s, entonces la onda se mueve 1.5 m en 0.5 s y su rapidez es 1.5 m dividido entre 0.5 s o 3 m/s. Dado que el periodo es el inverso de la frecuencia, la fórmula rapidez de onda = longitud de onda/periodo también puede escribirse como:

$$\text{Rapidez de onda} = \text{frecuencia} \times \text{longitud de onda}$$

Esta relación es válida en todos los tipos de ondas, se trate de olas, ondas sonoras u ondas luminosas.

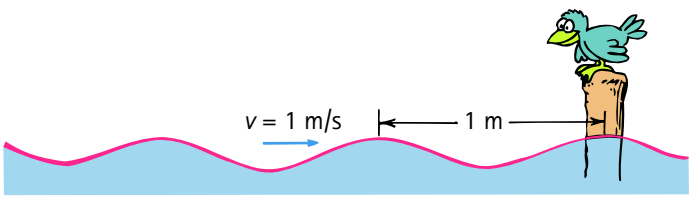



**FIGURA 19.9**
Si la longitud de onda es 1 m, y una longitud de onda por segundo pasa por el poste, entonces la rapidez de la onda es 1 m/s.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Si un tren de vagones de carga, cada uno de 10 m de largo, rueda a tu lado a la tasa de tres vagones cada segundo, ¿cuál es la rapidez del tren?**
2. **Si una ola oscila hacia arriba y hacia abajo tres veces cada segundo, y la distancia entre las crestas de la ola es 2 m, ¿cuál es su frecuencia? ¿Cuál es su longitud de onda? ¿Cuál es su rapidez de onda?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. 30 m/s. Puedes ver esto en dos formas. (a) De acuerdo con la definición de rapidez del Capítulo 2, $v = d/t = (3 \times 10 \text{ m})/1 \text{ s} = 30 \text{ m/s}$, pues 30 m de tren pasan junto a ti en 1 s. (b) Si comparas el tren con el movimiento ondulatorio, donde la longitud de onda corresponde a 10 m y la frecuencia es 3 Hz, entonces rapidez = frecuencia × longitud de onda = 3 Hz × 10 m = 3/s × 10 m = 30 m/s. (Observa que 3 Hz es 3 ciclos en 1 s, o simplemente 3/s, porque los ciclos, que sólo son una cuenta, no necesitan escribirse en la unidad para frecuencia.)
2. La frecuencia de la ola es 3 Hz, su longitud de onda es 2 m y su rapidez de onda = frecuencia × longitud de onda = 3/s × 2 m = 6 m/s.

La rapidez $v$ de una onda se puede expresar con la ecuación $v = f\lambda$, donde $f$ es la frecuencia de la onda y $\lambda$ (letra griega lambda minúscula) es la longitud de onda de la onda.

## 19.5 Interferencia de ondas

Mientras que un objeto material como una roca no puede compartir su espacio con otra roca, más de una vibración u onda sí pueden existir al mismo tiempo en el mismo espacio. Si sueltas dos rocas en el agua, las ondas producidas por cada una pueden encontrarse y producir **interferencia de ondas**. El traslape de ondas puede formar un **patrón de interferencia**. Dentro del patrón, los efectos ondulatorios pueden aumentar, disminuir o neutralizarse.

Cuando más de una onda ocupa el mismo espacio al mismo tiempo, los desplazamientos se suman en todo punto. Éste es el *principio de superposición*. De modo que, cuando la cresta de una onda se traslapa con la cresta de otra, sus efectos individuales se suman para producir una onda de amplitud aumentada. A esto se le llama *interferencia constructiva* (Figura 19.10). Cuando la cresta de una onda se traslapa con el valle de otra, sus efectos individuales se reducen. La parte alta de una onda tan sólo llena la parte baja de la otra. A esto se le llama *interferencia destructiva*.

La interferencia de ondas se aprecia mejor en el agua. En la Figura 19.11 se ve el patrón de interferencia que se forma cuando dos objetos que vibran tocan la superficie del

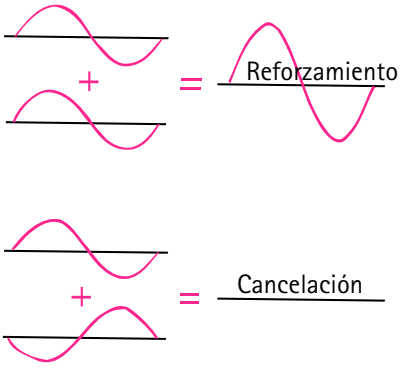



**FIGURA 19.10**
Interferencias constructiva y destructiva de una onda transversal.

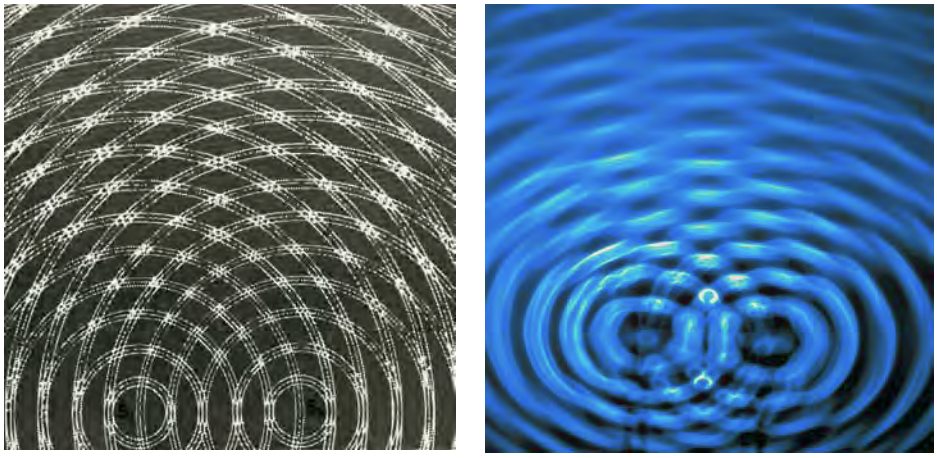


**FIGURA 19.11**
Dos conjuntos de ondas en el agua que se traslapan producen un patrón de interferencia. La imagen izquierda es un dibujo idealizado de las ondas que se expanden a partir de dos fuentes. La imagen derecha es una fotografía de un patrón de interferencia real.

agua. Puedes ver las regiones donde una cresta de una onda se traslapa con el valle de otra para producir regiones de amplitud cero. En los puntos a lo largo de dichas regiones, las ondas llegan sin ritmo. Se dice que están *fuera de fase* una con respecto a la otra.

La interferencia es característica de todo movimiento ondulatorio, ya sea que las ondas sean olas, ondas sonoras u ondas luminosas. La interferencia del sonido se abordará en el Capítulo 20, y la interferencia de la luz en el Capítulo 29.

## Ondas estacionarias

Si amarras una soga a una pared y sacudes el extremo libre hacia arriba y hacia abajo, produces un tren de ondas en la soga. La pared es muy rígida para sacudirse, así que las ondas se reflejan de vuelta a lo largo de la soga. Si sacudes la soga del modo correcto, puedes hacer que las ondas incidente y reflejada formen una **onda estacionaria**, donde partes de la soga, llamadas *nodos*, parecen quedarse quietas. Los nodos son las regiones de desplazamiento mínimo o cero, con energía mínima o cero. Por el contrario, los *antinodos* (no indicados en la Figura 19.12) son las regiones de desplazamiento máximo y energía máxima. Puedes poner los dedos justo arriba y abajo de los nodos y la soga no los tocará. Otras partes de la soga, en especial los antinodos, harían contacto con tus dedos. Los antinodos ocurren a medio camino entre los nodos.

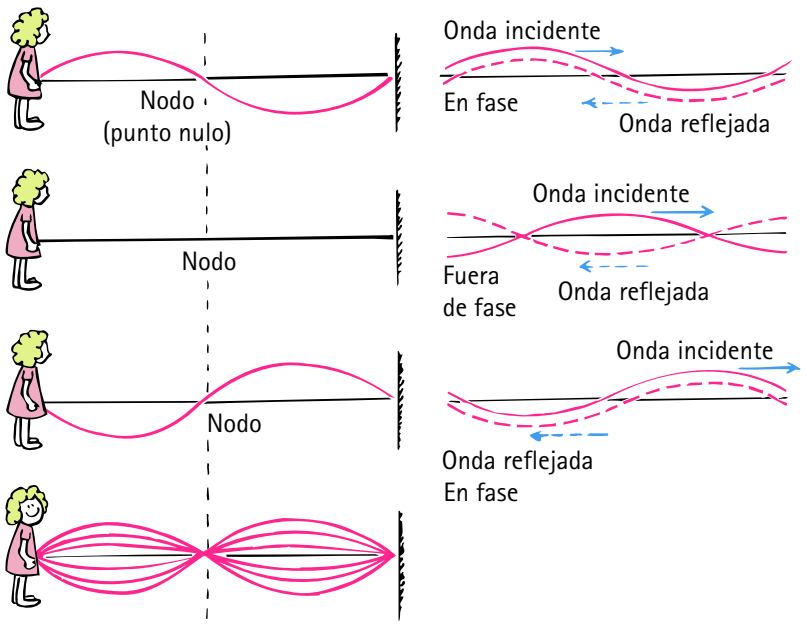



**FIGURA 19.12**
Las ondas incidente y reflejada interfieren en la producción de una onda estacionaria.

Las ondas estacionarias son resultado de la interferencia (y, como verás en el Capítulo 20, de la *resonancia*). Cuando dos conjuntos de ondas de igual amplitud y longitud de onda pasan una a través de la otra en direcciones opuestas, las ondas están constantemente en fase y fuera de fase unas con otras. Esto ocurre con una onda que se refleja sobre sí misma. Se producen regiones fijas de interferencia constructiva y destructiva.

Es fácil producir ondas estacionarias. Amarra una soga (o, mejor, una banda de caucho) a un soporte firme. Sacude la banda hacia arriba y hacia abajo con la mano. Si sacudes la banda con la frecuencia correcta, establecerás una onda estacionaria, como se muestra en la Figura 19.13a). Sacude la banda con el doble de frecuencia y resultará una onda estacionaria con la mitad de la longitud de onda anterior, que tiene dos bucles (Figura 19.13b). (La distancia entre nodos sucesivos es media longitud de onda; dos bucles constituyen una longitud de onda completa.) Si triplicas la frecuencia, resultará una onda estacionaria con un tercio de la longitud de onda original, que tiene tres bucles (Figura 19.13c), y así sucesivamente.

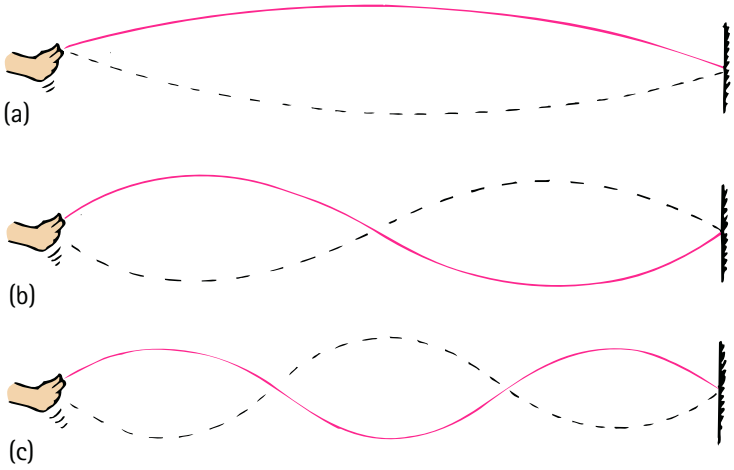



**FIGURA 19.13**
(a) Sacude la soga hasta que origines una onda estacionaria de un segmento (½ de longitud de onda).
(b) Sacude con el doble de frecuencia y produces una onda con dos segmentos (1 longitud de onda).
(c) Sacude con tres veces la frecuencia y produces tres segmentos (1½ longitudes de onda).

Las ondas estacionarias se producen en las cuerdas de los instrumentos musicales cuando se pulsan, se tocan con un arco o se golpean. Se producen en el aire en un tubo de órgano, una trompeta o un clarinete y el aire de una botella de gaseosa cuando se sopla aire sobre su parte superior. Puedes causar ondas estacionarias en una tina de agua o en una taza de café si mueves la tina o la taza hacia atrás y hacia adelante con la frecuencia correcta. Las ondas estacionarias pueden producirse con vibraciones transversales o longitudinales.

Un tubo de órgano o una flauta producen sonido mediante ondas estacionarias en una columna de aire.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Es posible que una onda cancele otra onda de modo que no permanezca ninguna amplitud en ciertos puntos?**
2. **Supón que estableces una onda estacionaria de tres segmentos, como se muestra en la Figura 19.13c. Si sacudes con el doble de frecuencia, ¿cuántos segmentos de onda ocurrirán en tu nueva onda estacionaria? ¿Cuántas longitudes de onda?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Sí. A esto se le llama interferencia destructiva. En una onda estacionaria en una soga, por ejemplo, partes de la soga no tienen amplitud: los nodos.
2. Si impartes el doble de frecuencia a la soga, producirás una onda estacionaria con el doble de segmentos, de modo que tendrás seis segmentos. Puesto que una longitud de onda completa tiene dos segmentos, tendrás tres longitudes de onda completas en tu onda estacionaria.

**FIGURA 19.14**
Satchmo produce ondas estacionarias de sonido en su trompeta.

## 19.6 Efecto Doppler

En la Figura 19.15 se muestra un patrón de ondas en el agua producidas por un bicho que zangolotea sus patas y oscila hacia arriba y hacia abajo en medio de un charco tranquilo. El bicho no va a ninguna parte sino simplemente pisotea el agua en una posición fija. Las ondas que produce son círculos concéntricos, porque la rapidez de onda es la misma en todas direcciones. Si el bicho oscila en el agua con una frecuencia constante, la distancia entre las crestas de la onda (la longitud de onda) es la misma en todas direcciones. Las ondas encuentran el punto A con tanta frecuencia como encuentran el punto B. Esto significa que la frecuencia del movimiento ondulatorio es la misma en los puntos A y B, o en cualquier parte en la vecindad del bicho. Esta frecuencia ondulatoria es la misma que la frecuencia de oscilación del bicho.

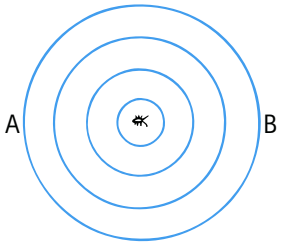



**FIGURA 19.15**
Vista superior de las ondas acuáticas formadas por un bicho estacionario que se zangolotea en agua apacible. Los círculos azules representan frentes de onda en el patrón que se expande.

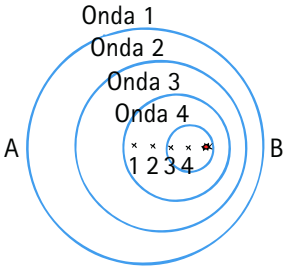



**FIGURA 19.16**
Olas formadas por un bicho que nada en agua apacible hacia el punto B.

Supón que el bicho en oscilación se mueve a través del agua con una rapidez menor que la rapidez de la onda. En efecto, el bicho alcanza parte de las ondas que produce. El patrón de onda se distorsiona y ya no forma círculos concéntricos (Figura 19.16). El centro de la onda exterior se produjo cuando el bicho estaba en el centro de dicho círculo. El centro de la siguiente onda más chica se produjo cuando el bicho estaba en el centro de dicho círculo y así sucesivamente. Los centros de las ondas circulares se mueven en la dirección del bicho que nada. Aunque el bicho mantiene la misma frecuencia de oscilación que antes, un observador en B vería las ondas llegar con más frecuencia. El observador mediría una mayor frecuencia. Esto se debe a que cada onda que le sigue tiene una distancia más corta para viajar y en consecuencia llega a B con más frecuencia a que si el bicho no se moviera hacia B. Un observador en A, por otra parte, mediría una frecuencia *menor* debido al tiempo más largo entre arribo de crestas de onda. Esto se debe a que, para llegar a A, cada cresta debe viajar más lejos que la antecedente debido al movimiento del bicho. Este cambio de frecuencia debido al movimiento de la fuente (o el receptor) se llama **efecto Doppler** (en honor del científico austriaco Christian Doppler, 1803-1853).

Las olas se dispersan sobre la superficie plana del agua. Las ondas sonoras y luminosas, por otra parte, viajan en espacio tridimensional en todas direcciones, como un globo en expansión. Tal como las ondas circulares están más juntas enfrente del bicho, las ondas sonoras o luminosas esféricas adelante de una fuente en movimiento están más juntas y llegan a un receptor más a menudo.

El efecto Doppler es evidente cuando escuchas el tono cambiante de la sirena de una ambulancia cuando pasa junto a ti. Cuando el vehículo se aproxima, el tono es más alto de lo normal (como una nota más alta en una escala musical). Esto se debe a que las crestas de las ondas sonoras encuentran tu oído con mayor frecuencia. Y cuando el vehículo pasa y se aleja, escuchas una caída en el tono porque las crestas de las ondas golpean tu oído con menor frecuencia.

**VIDEO:**
**Efecto Doppler**

**FIGURA 19.17**
El tono (la frecuencia) del sonido es más alto cuando una fuente se mueve hacia ti, y más bajo cuando la fuente se aleja.

El efecto Doppler también ocurre con la luz. Cuando una fuente luminosa se aproxima, hay un aumento en su frecuencia medida; cuando se aleja, hay una disminución en su frecuencia. Al aumento de frecuencia se le llama *corrimiento al azul*, porque el aumento es hacia el extremo de alta frecuencia (o azul) del espectro de color. Una disminución de frecuencia se llama *corrimiento al rojo*, en referencia a un desplazamiento hacia el extremo de menor frecuencia (o rojo) del espectro de color. Las galaxias distantes, por ejemplo, muestran un corrimiento al rojo en la luz que emiten. Con la medición de este corrimiento se puede calcular su rapidez de retroceso. Una estrella que gira con rapidez muestra luz que corre al rojo desde el lado que se aleja de ti y luz que corre al azul desde el lado que se acerca hacia ti. Esto permite a los astrónomos calcular la tasa de giro de la estrella.

Ten claridad sobre la diferencia entre *frecuencia* y *rapidez*. Qué tan frecuentemente vibra una onda es muy diferente de qué tan rápido se mueve de un lugar a otro.

**PUNTO DE CONTROL**

**Mientras estás en reposo, una fuente sonora se mueve hacia ti. ¿Tú mides la rapidez de su onda sonora como mayor o menor a que si la fuente estuviera estacionaria?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

¡Ninguna de las dos! Tanto la *frecuencia* como la longitud de onda experimentan un cambio cuando la fuente se mueve, pero no la *rapidez de la onda*. Ten clara la diferencia entre frecuencia y rapidez.

## 19.7 Ondas de proa

Cuando la rapidez de una fuente es tan grande como la rapidez de las ondas que produce, ocurre algo interesante: las ondas se apilan enfrente de la fuente. Considera el bicho del ejemplo anterior cuando nada con la rapidez de la onda. ¿Puedes ver que el bicho alcanzará las ondas que produce? En lugar de que las ondas se muevan adelante del bicho, éstas se superponen y amontonan unas con otras directamente enfrente del bicho (Figura 19.18). El bicho se mueve justo con el borde frontal de las ondas que produce.

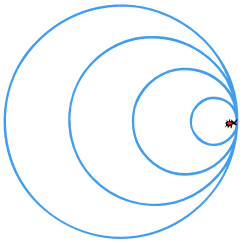


**FIGURA 19.18**
Patrón de ondas creado por un bicho que nada a rapidez de onda.

Algo similar ocurre cuando un avión viaja a la rapidez del sonido. En los primeros días de la aviación jet, se creía que este amontonamiento de ondas sonoras enfrente del avión imponía una "barrera del sonido" y que, con la finalidad de ir más rápido que la rapidez del sonido, el avión tendría que "romper la barrera del sonido". Lo que en realidad ocurre es que las crestas de onda que se traslapan perturban el flujo de aire sobre las alas, lo que hace más difícil controlar el avión. Pero la barrera no es real. Así como un bote puede viajar con facilidad más rápido que las ondas que produce, un avión con suficiente potencia viaja fácilmente más rápido que la rapidez del sonido. Entonces se dice que es *supersónico*. Un avión supersónico vuela en el aire tranquilo y sin perturbaciones porque ninguna onda sonora puede propagarse enfrente de él. De igual modo, un bicho que nada más rápido que la rapidez de las olas siempre se encuentra entrando en el agua con una superficie tranquila sin ondulaciones.

Cuando el bicho nada más rápido que la rapidez de onda, lo ideal es que produzca un patrón de onda, como se muestra en la Figura 19.19. Éste rebasa las ondas que produce. Las ondas se traslapan en los bordes y producen una forma en V, llamada **onda de proa**, que parece arrastrarse detrás del bicho. La familiar onda de proa generada por un bote de carreras que "rebana" el agua no es una onda oscilatoria típica. Es una perturbación producida por el traslape de muchas ondas circulares.

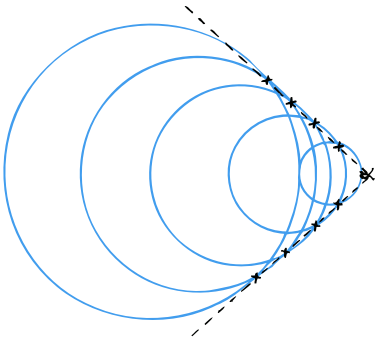


**FIGURA 19.19**
Una onda de proa, el patrón producido por un bicho que nada más rápido que la rapidez de onda. Los puntos donde se superponen ondas adyacentes (×) producen la forma en V.

En la Figura 19.20 se muestran algunos patrones de onda producidos por fuentes que se mueven con varias rapideces. Observa que, después de que la rapidez de la fuente supera la rapidez de onda, el aumento de rapidez de la fuente produce una forma en V más estrecha.[3]

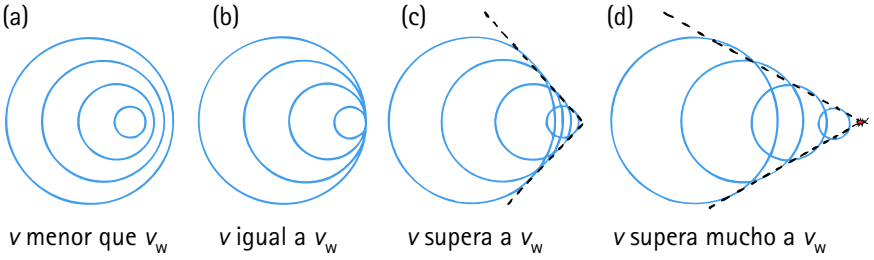



**FIGURA 19.20**
Patrones producidos por un bicho que nada con rapideces cada vez mayores. El traslape en los bordes sólo ocurre cuando el bicho nada más rápido que la rapidez de onda ($v_w$).

## 19.8 Ondas de choque

Un bote de carreras que "rebana" el agua genera una onda de proa bidimensional. Un avión supersónico genera de igual manera una **onda de choque** tridimensional. Así como la onda de proa se produce por el traslape de círculos que forman una V, una onda de choque se produce por el traslape de esferas que forman un cono. Y, así como la onda de proa de un bote de carreras se dispersa hasta que alcanza la orilla de un lago, la onda cónica generada por un avión supersónico se dispersa hasta que llega al suelo.

La onda de proa de un bote de carreras que pasa junto a ti puede salpicarte y mojarte si estás en la orilla del agua. En un sentido, puedes decir que eres golpeado por un "estampido acuático". De la misma forma, cuando el cascarón cónico de aire comprimido que barre detrás de un avión supersónico llega a los escuchas en el suelo, el agudo chasquido que escuchan se describe como **estampido sónico**.

**FIGURA 19.21**
Este avión produce una nube de vapor de agua que recién se condensó por el aire en rápida expansión en la región rarificada detrás de la pared de aire comprimido.

[3]Las ondas de proa generadas por los botes en el agua en realidad son más complejas de lo que se indica aquí. Se abordó de un modo ideal para ofrecer una analogía con la producción de las ondas de choque menos complejas en el aire.

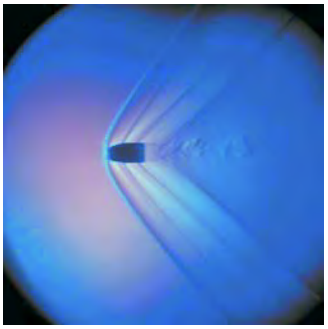


**FIGURA 19.22**
La bala que viaja más rápido que la rapidez del sonido comprime el aire en su trayectoria y produce detalles visibles de la onda de choque.

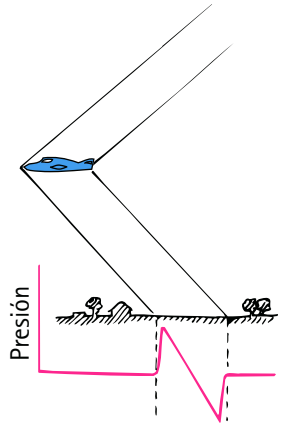



**FIGURA 19.23**
En realidad, la onda de choque está constituida por dos conos: un cono de presión alta, con el ápice en la proa del avión, y un cono de presión baja, con el ápice en la cola. Una gráfica de la presión del aire a nivel del suelo entre los conos adopta la forma de la letra N.

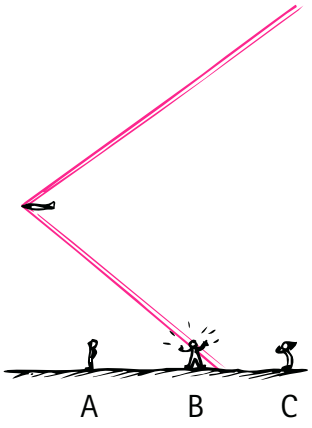



**FIGURA 19.25**
La onda de choque todavía no llega al escucha A, pero ahora llega al escucha B y ya llegó al escucha C.

El estampido sónico no se escucha con un avión que viaja a menor rapidez que el sonido, o subsónico, porque las ondas sonoras que llegan a tus oídos se perciben como un tono continuo. Sólo cuando el avión se mueve más rápido que el sonido, las ondas se traslapan para llegar al escucha en una sola explosión. El súbito aumento de presión en gran medida tiene el mismo efecto que la expansión súbita del aire producido por una explosión. Ambos procesos dirigen un estallido de aire a alta presión hacia el escucha. El oído se presiona con fuerza para distinguir entre la presión alta de una explosión y la presión alta de muchas ondas traslapadas.

Un esquiador acuático está familiarizado con el hecho de que, junto a la alta cresta de la onda de proa con forma de V, hay una depresión con forma de V. Lo mismo sucede con una onda de choque, que por lo general consiste en dos conos: un cono de presión alta generado en la proa del avión supersónico y un cono de presión baja que sigue a la cola del avión.[4] Los bordes de estos conos son visibles en la fotografía de la bala supersónica de la Figura 19.22. Entre estos dos conos, la presión del aire se eleva abruptamente por arriba de la presión atmosférica, luego cae por debajo de la presión atmosférica antes de regresar abruptamente a lo normal más allá del cono de la cola interior (Figura 19.23). Este exceso de presión seguido en forma súbita de una baja presión intensifica el estampido sónico.

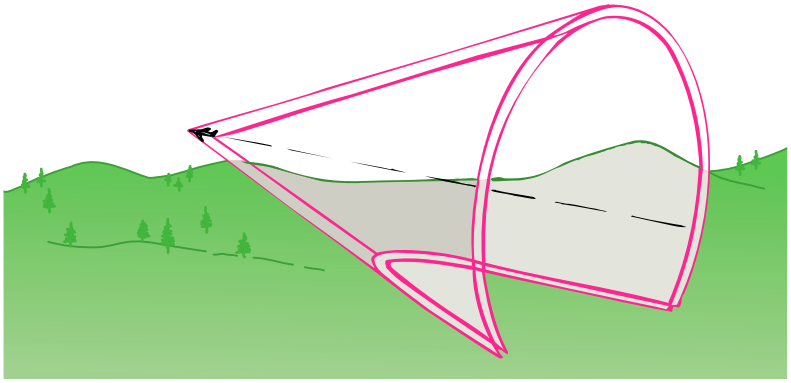


**FIGURA 19.24**
Una onda de choque.

A menudo se tiene la idea equivocada de que los estampidos sónicos se producen cuando un avión vuela a través de la "barrera del sonido"; esto es, justo cuando el avión sobrepasa la rapidez del sonido. Esto es lo mismo que decir que un bote produce una onda de proa cuando primero supera sus propias ondas. Esto no es así. El hecho es que una onda de choque y su estampido sónico resultante barren en forma continua detrás y abajo de un avión que viaja más rápido que el sonido, tal como una onda de proa barre de manera continua detrás de un bote de carreras. En la Figura 19.25, el escucha B está en el proceso de escuchar un estampido sónico, el escucha C ya lo escuchó y el escucha A lo escuchará dentro de poco. ¡El avión que generó esta onda de choque tal vez rompió la barrera del sonido hace muchos minutos!

No es necesario que la fuente en movimiento sea "ruidosa" para producir una onda de choque. Una vez que un objeto se mueve más rápido que la rapidez del sonido *producirá* sonido. Una bala supersónica que pasa sobre tu cabeza produce un chasquido, que es un pequeño estampido sónico. Si la bala fuese más grande y perturbara más aire en su trayectoria, el chasquido sería más parecido a un estampido. Cuando un domador de leones chasquea un látigo, el sonido del chasquido en realidad es un estampido sónico producido por la punta del látigo cuando viaja más rápido que la rapidez del sonido. Tanto la bala como el látigo no son en sí mismos una fuente de sonido, pero, cuando viajan con rapideces supersónicas, producen su propio sonido cuando generan ondas de choque.

[4]Con frecuencia, las ondas de choque son más complejas e involucran múltiples conos.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Curva sinusoidal.** La forma de onda trazada por el movimiento armónico simple, que puede hacerse visible sobre una banda transportadora en movimiento mediante un péndulo que se balancea en ángulos rectos por encima de la banda en movimiento.

**Amplitud.** Para una onda o vibración, el desplazamiento máximo a cualquier lado de la posición de equilibrio (el punto medio).

**Longitud de onda.** Distancia entre crestas, valles o partes idénticas sucesivas de una onda.

**Frecuencia.** Para un cuerpo o medio que vibra, el número de vibraciones por unidad de tiempo. Para una onda, el número de crestas que pasan por un punto particular por unidad de tiempo.

**Hertz.** La unidad del SI de frecuencia. Un hertz (símbolo Hz) es igual a una vibración por segundo.

**Periodo.** Tiempo en el que se completa una vibración. El periodo de una onda es igual al periodo de la fuente y es igual a 1/frecuencia.

**Onda transversal.** Una onda en la que el medio vibra en una dirección perpendicular (en ángulo recto) respecto de la dirección en la que viaja la onda. Las ondas luminosas y las ondas en los instrumentos de cuerda son transversales.

**Onda longitudinal.** Una onda en la que el medio vibra en una dirección paralela a (a lo largo de) la dirección en la que viaja la onda. Las ondas sonoras son longitudinales.

**Rapidez de onda.** La rapidez con la que las ondas pasan por un punto particular:

$$\text{Rapidez de onda} = \text{frecuencia} \times \text{longitud de onda}$$

**Interferencia de onda.** Fenómeno que ocurre cuando dos ondas se encuentran mientras viajan por el mismo medio.

**Patrón de interferencia.** Patrón formado por la superposición de diferentes conjuntos de ondas que producen un reforzamiento en algunos lugares y una cancelación en otros.

**Onda estacionaria.** Patrón de interferencia estacionario formado en un medio cuando dos conjuntos de ondas idénticas pasan por el medio en direcciones opuestas.

**Efecto Doppler.** Corrimiento en la frecuencia recibida debida al movimiento de una fuente en vibración que se acerca o se aleja de un receptor.

**Onda de proa.** Perturbación con forma en V creada por un objeto que se mueve a través de una superficie líquida con una rapidez mayor que la rapidez de onda.

**Onda de choque.** Perturbación con forma de cono creada por un objeto que se mueve con rapidez supersónica a través de un fluido.

**Estampido sónico.** Fuerte sonido que resulta de la incidencia de una onda de choque.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 19.1 Buenas vibraciones

1. ¿Cómo se le llama a un *meneo en el tiempo*? ¿Cómo llamas a un *meneo en el espacio* y el tiempo?
2. ¿Cuál es la fuente de todas las ondas?
3. ¿Qué se entiende por el *periodo* de un péndulo?
4. ¿Cuál tiene el periodo más largo: un péndulo corto o uno largo?

### 19.2 Descripción de ondas

5. ¿Cómo se relaciona una curva sinusoidal con la descripción de una onda?
6. Distingue entre estos diferentes aspectos de una onda: periodo, amplitud, longitud de onda y frecuencia.
7. ¿Cuántas vibraciones por segundo se representan en una onda de radio de 101.7 MHz?
8. ¿Cuál es la relación entre la frecuencia y el periodo?

### 19.3 Movimiento ondulatorio

9. En una palabra, ¿qué es lo que se mueve de la fuente al receptor en el movimiento ondulatorio?
10. ¿El medio donde viaja una onda se mueve con la onda?
11. En una onda transversal, ¿en qué dirección son las vibraciones, en relación con la dirección de viaje de la onda?
12. En una onda longitudinal, ¿en qué dirección son las vibraciones, en relación con la dirección de viaje de la onda?
13. La longitud de onda de una onda transversal es la distancia entre crestas (o valles) sucesivas. ¿Cuál es la longitud de onda de una onda longitudinal?

### 19.4 Rapidez de ondas

14. ¿Cuál es la relación entre la frecuencia, la longitud de onda y la rapidez de onda?

### 19.5 Interferencia de ondas

15. ¿Qué es el principio de superposición?
16. Distingue entre interferencia constructiva e interferencia destructiva.
17. ¿Qué tipos de ondas pueden mostrar interferencia?
18. ¿Qué es un nodo? ¿Qué es un antinodo?
19. ¿Las ondas estacionarias pueden formarse de ondas transversales, ondas longitudinales o ambas?

### 19.6 Efecto Doppler

20. En el efecto Doppler, ¿cambia la frecuencia? ¿Cambia la rapidez de la onda?
21. ¿El efecto Doppler puede observarse con ondas longitudinales, con ondas transversales o con ambas?
22. ¿Qué se entiende por corrimiento al azul y corrimiento al rojo para la luz?

### 19.7 Ondas de proa

23. ¿Qué tan rápido debe nadar un bicho para alcanzar las ondas que produce? ¿Qué tan rápido debe moverse para producir una onda de proa?
24. ¿Qué tan rápido vuela un avión supersónico en comparación con la rapidez del sonido?
25. ¿Cómo es que la forma en V de una onda de proa depende de la rapidez de la fuente?

### 19.8 Ondas de choque

26. Una onda de proa sobre la superficie del agua es bidimensional. ¿Cómo es una onda de choque en el aire?
27. Verdadero o falso: un estampido sónico sólo ocurre cuando un avión rompe la barrera del sonido. Defiende tu respuesta.
28. Verdadero o falso: para que un objeto produzca un estampido sónico, debe ser "ruidoso". Ofrece dos ejemplos que apoyen tu respuesta.

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

29. Amarra un tubo de caucho, un resorte o una soga a un soporte fijo y produce ondas estacionarias. Observa cuántos nodos puedes producir.
30. Mójate el dedo y frótalo en forma lenta alrededor del borde de una copa de vino con pie largo y borde delgado, al tiempo que sostienes firmemente la base de la copa sobre una mesa con la otra mano. La fricción de tu dedo creará ondas estacionarias en la copa, en forma muy parecida a las ondas producidas sobre las cuerdas de un violín por la fricción de un arco de violín. Inténtalo con un tazón metálico.
31. Escribe una carta a la abuela y cuéntale cómo pueden cancelarse entre sí las ondas. Luego describe cuáles son algunas de las aplicaciones actuales de este fenómeno físico.

## SUSTITUYE Y LISTO (FAMILIARIZACIÓN CON ECUACIONES)

$$\textbf{Frecuencia} = \frac{1}{\textbf{periodo}};\ f = 1/T$$

32. ¿Cuál es la frecuencia, en hertz, que corresponde a cada uno de los siguientes periodos: (a) 0.10 s, (b) 5 s, (c) 1/60 s?

$$\textbf{Periodo} = \frac{1}{\textbf{frecuencia}};\ T = 1/f$$

33. ¿Cuál es el periodo, en segundos, que corresponde a cada una de las siguientes frecuencias: (a) 10 Hz, (b) 0.2 Hz, (c) 60 Hz?

$$\textbf{Rapidez de onda} = \frac{\textbf{longitud de onda}}{\textbf{periodo}}\ \textbf{o}$$

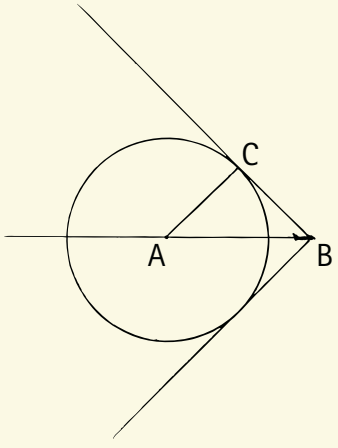
$$\textbf{frecuencia} \times \textbf{longitud de onda};$$

$$v = f\lambda$$

34. ¿Cuál es la rapidez de una ola que tiene 2 Hz de frecuencia y 1.5 m de longitud de onda?
35. ¿Qué tan rápido viaja una onda sonora de 200 Hz que tiene una longitud de onda de 1.7 m?

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

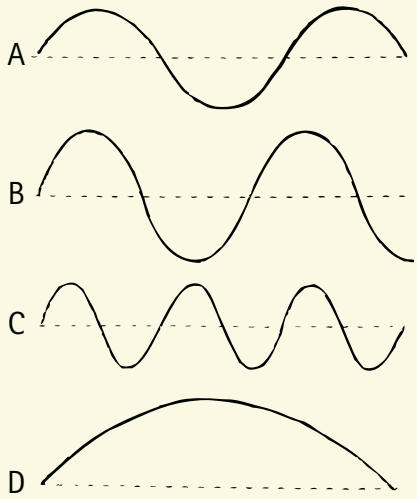
36. El capitán de un barco observa que las crestas de una onda pasan por la cadena de su ancla cada 5 s. Estima que la distancia entre las crestas de la onda es de 15 m. También estima de manera correcta la rapidez de las ondas. Demuestra que esta rapidez es de 3 m/s.
37. Se observa que un peso suspendido de un resorte sube y baja una distancia de 20 cm dos veces cada segundo. ¿Cuál es su frecuencia? ¿Su periodo? ¿Su amplitud?
38. Un mosquito bate las alas a 600 vibraciones por segundo, lo que produce el molesto zumbido de 600 Hz. Dado que la rapidez del sonido es 340 m/s, ¿cuánto viaja el sonido entre batimientos de alas? En otras palabras, encuentra la longitud de onda del sonido del mosquito.
39. En un teclado, tocas el do medio, cuya frecuencia es de 256 Hz.
    a. ¿Cuál es el periodo de una vibración de este tono?
    b. Conforme el sonido sale del instrumento con una rapidez de 340 m/s, ¿cuál es su longitud de onda en el aire?
40. Como se muestra en el dibujo, el ángulo medio del cono de la onda de choque generado por un avión supersónico es de 45°. ¿Cuál es la rapidez del avión relativa a la rapidez del sonido?



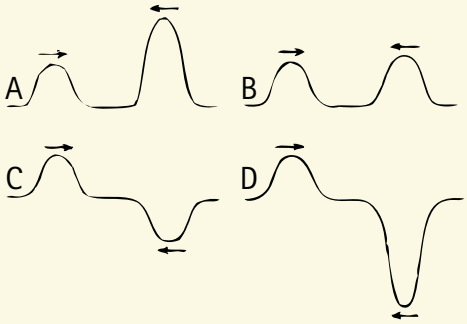

41. Una astronauta en la Luna amarra una pequeña bola de latón a una cuerda de 1.00 m y fabrica un péndulo simple. Cronometra 15 oscilaciones completas en un tiempo de 75 segundos. A partir de esta medición, calcula la aceleración debida a la gravedad en la Luna. ¿Cuál es el resultado?

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

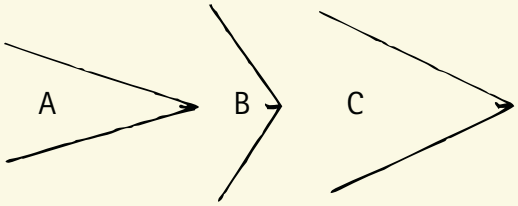
42. Todas las ondas que se muestran tienen la misma rapidez en el mismo medio. Con una regla clasifica estas ondas, de mayor a menor, para (a) amplitud, (b) longitud de onda, (c) frecuencia y (d) periodo.




43. A continuación se muestran cuatro diferentes pares de pulsos de ondas transversales que se mueven una hacia otra. En algún punto en el tiempo, los pulsos se encuentran e interactúan (interfieren) entre sí. Clasifica los cuatro casos, de mayor a menor, sobre la base de la altura del pico que resulta cuando los centros de los pulsos coinciden.




44. Clasifica los tonos que se escuchan de la sirena de un carro de bomberos, de más alto a más bajo, cuando el carro de bomberos viaja
    a. hacia el escucha a 30 km/h.
    b. hacia el escucha a 50 km/h.
    c. alejándose del escucha a 20 km/h.
45. Un avión supersónico produce las ondas de choque A, B, C. Clasifica sus rapideces de mayor a menor.




## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

46. ¿El periodo de un péndulo depende de la masa de la lenteja? ¿De la longitud de la cuerda?
47. Si un péndulo se acorta, ¿su frecuencia aumenta o disminuye? ¿Y su periodo?
48. Un reloj de pie marca la hora de modo perfecto. Luego se reubica en una casa de verano en la cima de las montañas. ¿Corre más rápido, más lento o igual? Explica.
49. Levanta un maletín vacío y balancéalo de ida y vuelta a su frecuencia natural. Si el maletín estuviera lleno de libros, ¿la frecuencia natural sería menor, mayor o la misma que antes?
50. ¿El tiempo necesario para balancearse de ida y vuelta (el periodo) en un columpio del parque es más largo o más corto cuando estás parado que cuando estás sentado? Explica.
51. ¿Qué ocurre con el periodo de una onda cuando la frecuencia disminuye?
52. ¿Qué ocurre con la longitud de onda de una onda cuando disminuye la frecuencia?
53. Si la rapidez de una onda se duplica mientras la frecuencia permanece igual, ¿qué ocurre con la longitud de onda?
54. Si la rapidez de una onda se duplica mientras la longitud de onda permanece igual, ¿qué ocurre con la frecuencia?
55. La aguja de una máquina de coser se mueve hacia arriba y hacia abajo en un movimiento armónico simple. Su fuerza impulsora proviene de una rueda giratoria que es impulsada por un motor eléctrico. ¿Cuál crees que sea la diferencia entre el periodo de la aguja que sube y baja y el periodo de la rueda giratoria? Defiende tu respuesta.
56. Con un tornillo de banco sujetas firmemente un extremo de una hoja de segueta. Pulsas el extremo libre y vibra. Si haces lo mismo, pero primero colocas un trozo de arcilla sobre el extremo libre, ¿cómo diferirá la frecuencia de vibración, si es que difiere? ¿Haría una diferencia si el trozo de arcilla estuviese pegado a la mitad? Explica. (¿Por qué esta pregunta podría plantearse en el Capítulo 8?)
57. Si sacudes el extremo de un resorte para producir una onda, ¿cuál es la diferencia entre la frecuencia de la onda y la frecuencia de tu mano que sacude? ¿Tu respuesta depende de si produces una onda transversal o una onda longitudinal? Defiende tu respuesta.
58. ¿Qué tipo de movimiento debes impartir a la boquilla de una manguera de jardín de modo que el chorro de agua resultante se aproxime a una curva sinusoidal?
59. ¿Qué tipo de movimiento debes impartir a un resorte estirado (o Slinky) para producir
    a. una onda transversal?
    b. una onda longitudinal?

60. ¿Qué tipo de onda es cada una de las siguientes?
    a. El sonido de una ballena que llama a otra ballena bajo el agua.
    b. Un pulso enviado por una cuerda estirada cuando golpea un extremo de la cuerda.
    c. Las vibraciones en una cuerda de guitarra.
61. La luz roja tiene una longitud de onda más larga que la luz violeta. ¿Cuál tiene la mayor frecuencia?
62. Si duplicas la frecuencia de un objeto en vibración o la onda que produce, ¿qué ocurre con el periodo?
63. ¿Cuál es la frecuencia del segundero de un reloj? ¿Del minutero? ¿De la manecilla de las horas?
64. Si sumerges el dedo repetidas veces en un charco, creas ondas. ¿Qué ocurre con la longitud de onda si sumerges el dedo con más frecuencia?
65. ¿Cómo se compara la frecuencia de vibración de un objeto pequeño que flota en el agua, con el número de ondas que pasan por él a cada segundo?
66. En términos de longitud de onda, muestra qué tan lejos viaja una onda en un periodo.
67. ¿Cuál es la fuente de las ondas mecánicas? ¿De las ondas electromagnéticas?
68. ¿Cuántos nodos, sin incluir los puntos extremos, hay en una onda estacionaria que tiene dos longitudes de onda de largo? ¿Tres longitudes de onda de largo?
69. Una roca se suelta en el agua y las ondas se dispersan por la superficie plana del agua. ¿En qué se convierte la energía de estas ondas cuando se extinguen?
70. Los patrones de onda de las Figuras 19.4 y 19.8 están compuestos de círculos. ¿Qué te dice esto acerca de la rapidez de las ondas que se mueven en diferentes direcciones?
71. ¿Por qué los relámpagos se ven antes de escuchar el trueno?
72. Un intérprete de banjo pulsa el punto medio de una cuerda sujeta en ambos extremos. ¿Dónde están los nodos de la onda estacionaria en la cuerda? ¿Cuál es la longitud de onda de la cuerda en vibración?
73. En ocasiones, los violinistas tocan con arco una cuerda para producir una vibración máxima (antinodos) a un cuarto y tres cuartos de la longitud de la cuerda en lugar de a la mitad de la cuerda. Entonces la cuerda vibra con una longitud de onda igual a la longitud de la cuerda en lugar de al doble de la longitud de la cuerda. (Observa la Figura 19.13a y b.) ¿Cuál es el efecto sobre la frecuencia cuando esto ocurre?
74. Un murciélago chirría al tiempo que vuela hacia una pared. ¿La frecuencia del eco del chirrido que recibe es mayor, menor o la misma que la emitida?
75. La locomotora de un ferrocarril está en reposo con su silbato chillante, luego comienza a moverse hacia ti.
    a. ¿La frecuencia del sonido que escuchas aumenta, disminuye o permanece igual?
    b. ¿Y qué hay de la longitud de onda que llega a tu oído?
    c. ¿Y qué hay de la rapidez del sonido en el aire entre tú y la locomotora?
76. ¿Por qué hay un efecto Doppler cuando la fuente de sonido es estacionaria y el escucha está en movimiento? ¿En qué dirección debe moverse el escucha para oír una frecuencia más alta? ¿Una frecuencia más baja?
77. Cuando tocas el claxon mientras conduces hacia un escucha estacionario, el escucha oye un aumento de la frecuencia del claxon. ¿El escucha escucharía un aumento de la frecuencia del claxon si también estuviera en un automóvil que viaja con la misma rapidez y en la misma dirección que tú? Explica.
78. ¿Existe un efecto Doppler apreciable cuando el movimiento de la fuente es en ángulo recto a un escucha? Explica.
79. ¿Cómo es que el efecto Doppler ayuda a la policía a detectar conductores que exceden límites de rapidez?
80. ¿Sería correcto decir que el efecto Doppler es el cambio aparente en la rapidez de una onda debido al movimiento de la fuente? (¿Por qué esta pregunta es tanto una prueba de lectura de comprensión como una prueba de conocimiento físico?)
81. ¿Por qué el fenómeno de la interferencia es importante en la producción de ondas de proa o de ondas de choque?
82. ¿Qué puedes decir de la rapidez de un bote que forma una onda de proa?
83. ¿Un estampido sónico ocurre en el momento en que un avión excede la rapidez del sonido? Explica.
84. ¿Por qué un avión subsónico, sin importar cuán ruidoso pueda ser, no puede producir un estampido sónico?
85. Imagina un pez superrápido que puede nadar más rápido que la rapidez del sonido en el agua. ¿Produciría un "estampido sónico"?
86. Elabora una pregunta de opción múltiple que demuestre que un compañero de clase comprendió la diferencia entre una onda transversal y una onda longitudinal.
87. Elabora una pregunta de opción múltiple que demuestre que un compañero de clase entendió cualquiera de los términos que describen una onda.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

88. Una persona pesada y una persona ligera se balancean de ida y vuelta sobre columpios de la misma longitud. Discute quién tiene el periodo más largo.
89. ¿Tiene sentido que la masa de una lenteja de un péndulo simple no afecte la frecuencia del péndulo? En tu discusión cita si la masa afecta o no la aceleración de caída libre.
90. Si una tapa de gas se enciende durante algunos segundos, alguien a un par de metros de distancia escuchará el gas que escapa mucho antes de olerlo. ¿Qué indica esto acerca de la rapidez del sonido y de la rapidez a la que se difunden las moléculas por el medio que transporta el sonido?
91. Analiza cómo algunos aprendices confunden los dos términos de *rapidez de onda* y *frecuencia de onda* cuando suponen que los términos se refieren a la misma cosa.
92. Los astrónomos descubren que la luz emitida por un elemento particular en un extremo del Sol tiene una frecuencia un poco mayor que la luz proveniente de dicho elemento en el extremo opuesto. ¿Qué te dicen estas mediciones acerca del movimiento del Sol?
93. Si el sonido de un avión no proviene de la parte del cielo donde se ve el avión, discute si esto implica o no que el avión viaja más rápido que la rapidez del sonido.
94. ¿El ángulo cónico de una onda de choque se ensancha, estrecha o permanece constante a medida que un avión aumenta su rapidez? Haz un dibujo que sustente tu argumento.

20

CAPÍTULO 20

# Sonido


20.1 La naturaleza del sonido
20.2 El sonido en el aire
20.3 Reflexión del sonido
20.4 Refracción del sonido
20.5 Vibraciones forzadas
20.6 Resonancia
20.7 Interferencia
20.8 Batimientos


1

2

3

4

1 Ken Ford fue uno de los primeros en usar audífonos antirruido para pilotear planeadores en silenciosa tranquilidad. 2 Los profesores de física Chris Chiaverina y Tom Rossing producen sonidos en un *hang*, un novedoso instrumento de acero que se toca con las manos. 3 Cathrine W. Tellefsen, en la University of Oslo, muestra flamas que oscilan con el sonido cuando se coloca una bocina cerca del extremo de un tubo lleno de gas. Ellen K. Henriksen cuenta los nodos, donde las flamas son más altas. 4 Emily Ackerman llega a una intrigante conclusión: ¡el sonido es lo *único* que puede oírse!

Una de las personas que mejor logró combinar en el mundo la tarea de físico, escritor y educador de física es Kenneth W. Ford, quien fue profesor en la University of California, presidente de colegio y director ejecutivo y presidente de consejo del American Institute of Physics antes de convertirse en profesor de los grados 9 a 12 en la Germantown Academy de Pennsylvania. Un experto y un escritor de física cuántica, Ken es un apasionado de la enseñanza, de volar pequeños aviones, de los planeadores y de su esposa Joanne. También es un amigo cercano y pule gran parte de mis escritos antes de que se publiquen. *Física conceptual* se ha beneficiado del profundo y amplio conocimiento en física de Ken, por lo cual estoy agradecido.

Cuando escribí por primera vez *Física conceptual*, el libro de texto de Ken *Basic Physics*, fue una inspiración para mí, como lo fueron los tres volúmenes de *Feynman's Lectures on Physics* y el libro de texto de Eric Rogers, *Physics for the Inquiring Mind*. Ken fue uno de los primeros revisores de *Física conceptual*. Lo elogió y adoptó para sus propias clases, me alertó de algunos errores y sugirió mejoras. Un refrán entre profesores dice que si quieres aprender una materia, enséñala. Yo agrego: si quieres sumar más a tu conocimiento de física, escribe acerca de ella. Yo aprendo continuamente, mucho, gracias a las aportaciones de Ken.

Como se observa en la primera fotografía al inicio del capítulo, Ken usaba audífonos a prueba de ruido cuando volaba aviones ruidosos hace algunos años. Su entretenido libro *In Love with Flying* destaca su pasión aun mayor por los vuelos sin motor: el vuelo planeado. En el retrato de Ken, observa la constante de Planck en la placa de su automóvil híbrido y un prendedor de planeador diamante en su solapa. Los últimos libros de Ken, escritos con total claridad, *In Love With Flying, The Quantum World: Quantum Physics for Everyone* y *101 Quantum Questions: What You Need to Know About the World You Can't See*, son esenciales para quien quiera aprender física cuántica. Además de ofrecer asesorías en línea a estudiantes de bachillerato, Ken escribe en la actualidad sobre su historia personal en el desarrollo de la primera bomba H en Los Álamos con su finado mentor, John Wheeler.

Mi dedicatoria a la octava edición de *Física conceptual* fue: A Kenneth W. Ford, eminente físico, gran ser humano. Esta dedicatoria sigue siendo vigente.

## 20.1 La naturaleza del sonido

Si un árbol cayera en medio de un espeso bosque a cientos de kilómetros de distancia de cualquier ser vivo, ¿habría sonido? Diferentes personas responderán esta pregunta en diferentes formas. "No", dirán algunos, "el sonido es subjetivo y se necesita un escucha. Si no hay escucha, no habrá sonido". "Sí", dirán otros, "un sonido no es algo en la cabeza de un escucha. Un sonido es una cosa objetiva". Con discusiones como ésta no suele llegarse a ningún acuerdo porque los participantes no se dan cuenta de que argumentan no acerca de la naturaleza del sonido, sino acerca de la definición de la palabra. Cualquier postura está en lo correcto, dependiendo de la definición que se utilice, pero la investigación sólo puede proceder cuando se acuerda una definición. Los científicos, como los cinco que se muestran en las fotografías al comienzo del capítulo, adoptan la posición objetiva y definen el sonido como una forma de energía que existe ya sea que se escuche o no. Ellos parten de ahí para investigar su naturaleza.

### Origen del sonido

Casi todos los sonidos son ondas producidas por las vibraciones de la materia. En un piano, un violín y una guitarra, el sonido se produce por las cuerdas en vibración; en un saxofón, por una caña (lengüeta) que vibra; en una flauta, por una columna de aire que ondula en la boquilla. Tu voz resulta de la vibración de tus cuerdas vocales. Los sonidos en el aire son causados por una amplia variedad de vibraciones.

En cada uno de estos casos, la vibración original estimula la vibración de algo más grande o más masivo, como la caja de resonancia de un instrumento de cuerda, la columna de aire en el interior de un instrumento de caña o viento, o el aire en la garganta y la boca de un cantante. Este material en vibración envía después una perturbación a través del medio circundante, por lo general aire, en forma de ondas longitudinales. Bajo condiciones ordinarias, las frecuencias de la fuente de vibración y las ondas

sonoras son iguales. La impresión subjetiva acerca de la frecuencia del sonido se describe con la palabra **tono**, también conocido como **altura**. La frecuencia corresponde a la altura: un sonido agudo de un flautín tiene una frecuencia de vibración alta, y un sonido grave de una sirena de niebla tiene una frecuencia de vibración baja.

En general, el oído de una persona joven puede escuchar tonos que corresponden al intervalo de frecuencias de más o menos entre 20 y 20,000 hertz. Con la edad, este rango de audición humana se reduce, especialmente en el extremo de alta frecuencia. Las ondas sonoras con frecuencias por debajo de 20 hertz son **infrasónicas**, y las que tienen frecuencias por arriba de 20,000 hertz se llaman **ultrasónicas**. El ser humano no puede escuchar ondas sonoras infrasónicas ni ultrasónicas. Infrasónica: una frecuencia demasiado baja para la audición humana. Ultrasónica: una frecuencia demasiado alta para la audición humana.

Los elefantes se comunican entre ellos con ondas infrasónicas. Sus grandes orejas les ayudan a detectar dichas ondas sonoras de baja frecuencia.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Cuál es la frecuencia de onda del sonido producido por un diapasón de 220 hertz?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

220 Hz.

## Medios que transmiten el sonido

La mayoría de los sonidos que escuchas se transmiten a través del aire. Sin embargo, cualquier sustancia elástica —ya sea sólida, líquida, gas o plasma— puede transmitir el sonido. La elasticidad es la propiedad de un material que cambia de forma en reacción a una fuerza aplicada y luego retoma su forma inicial una vez que se retira la fuerza de distorsión. El acero es una sustancia elástica. Por el contrario, la masilla es inelástica.[1] En los líquidos y sólidos elásticos, los átomos están relativamente juntos, responden con rapidez a los movimientos mutuos y transmiten energía con poca pérdida. El sonido viaja cerca de 4 veces más rápido en el agua que en el aire y alrededor de 15 veces más rápido en el acero que en el aire.

En relación con los sólidos y los líquidos, el aire es un mal conductor del sonido. Puedes escuchar el sonido de un tren distante con más claridad si pones el oído contra la vía. De igual modo, el tictac de un reloj colocado sobre una mesa más lejana de la distancia de audición puede escucharse si pones el oído sobre la mesa. O haz sonar piedras bajo el agua mientras tu oído está sumergido. Escucharás el sonido de los golpes con mucha claridad. Si alguna vez nadaste en presencia de botes motorizados, es probable que hayas observado que puedes escuchar los motores de los botes con mucha más claridad bajo el agua que sobre ella. Los líquidos y los sólidos cristalinos por lo general son excelentes conductores del sonido —mucho mejores que el aire—. La rapidez del sonido suele ser mayor en los sólidos que en los líquidos, y mayor en los líquidos que en los gases. El sonido no viajará en el vacío porque no hay nada que comprimir o expandir.

Los átomos y las moléculas en un medio tiemblan cuando transmiten sonido. El sonido no puede viajar en el vacío porque no hay nada que lo haga temblar.

## 20.2 El sonido en el aire

Cuando aplaudes, el sonido producido no es periódico. Consiste en un *pulso* de ondas que viajan hacia afuera en todas direcciones. Para entender mejor cómo se mueve un pulso en el aire, considera una habitación larga, como la que se muestra en la Figura 20.1a. En un extremo hay una ventana abierta con una cortina sobre ella. En el otro extremo hay una puerta. Cuando abres la puerta, puedes imaginar que la puerta

[1]Elasticidad no es "capacidad de estiramiento", como en una banda de caucho. Algunos materiales muy rígidos son elásticos, como el acero.

empuja las moléculas junto a ella y las aleja de sus posiciones iniciales y hacia sus vecinas. Las moléculas vecinas, a su vez, empujan sobre sus vecinas, y así sucesivamente, como una compresión que viaja a lo largo de un resorte, hasta que la cortina ondula fuera de la ventana. Un pulso de aire comprimido se movió de la puerta a la cortina. Este pulso de aire comprimido se llama **compresión**.

Cuando cierras la puerta, como en la Figura 20.1b, la puerta saca de la habitación algunas moléculas de aire. Esto produce un área de presión baja detrás de la puerta. Entonces las moléculas vecinas se mueven hacia esa área, lo que deja una zona de menor presión detrás de ellas. Se dice que esta zona de aire a menor presión está *rarificada*. Otras moléculas más alejadas de la puerta, a su vez, se mueven hacia estas regiones rarificadas, y de nuevo una perturbación viaja por toda la habitación. Esto lo demuestra la cortina, que ondula hacia adentro. Esta vez la perturbación es una **rarefacción**.

Como en todo el movimiento ondulatorio, no es el medio en sí el que viaja por la habitación, sino el pulso que transporta energía. Tanto en la compresión como en la rarefacción, el pulso viaja de la puerta a la cortina. Esto se sabe porque, en ambos casos, la cortina se mueve después de que la puerta se abre o se cierra. Si abres y cierras la puerta de manera continua y periódica, puedes establecer una onda de compresiones y rarefacciones periódicas que harán que la cortina se balancee hacia adentro y hacia afuera de la ventana. En una escala mucho menor pero más rápida, esto es lo que ocurre cuando golpeas un diapasón. Las vibraciones periódicas del diapasón y las ondas producidas son mucho mayores en frecuencia y menores en amplitud que las causadas por la puerta que se balancea. No observas el efecto de las ondas sonoras sobre la cortina, pero estás muy al tanto de ellas cuando llegan a tus tímpanos sensibles.

Considera las ondas sonoras del tubo que se muestra en la Figura 20.2. Por simplicidad, sólo se muestran las ondas que viajan en el tubo. Cuando el brazo del diapasón junto al tubo se mueve hacia el tubo, una compresión entra en el tubo. Cuando el brazo se aleja en la dirección opuesta, una rarefacción le sigue a la compresión. Es como una raqueta de ping-pong que se mueve de ida y vuelta en una habitación llena con pelotas de ping-pong. A medida que la fuente vibra, se produce una serie de compresiones y rarefacciones. La frecuencia de la fuente que vibra y la frecuencia de la onda que produce son iguales.

Haz una pausa para reflexionar acerca de la física del sonido mientras escuchas tu radio en algún momento. La bocina del radio es un cono de papel que vibra al ritmo de una señal eléctrica. Las moléculas de aire junto al cono que vibra de la bocina se ponen en vibración. Este aire, a su vez, vibra contra las partículas vecinas que, por su parte, hacen lo mismo, y así sucesivamente. Como resultado, de la bocina emanan patrones rítmicos de aire comprimido y rarificado, lo que inunda toda

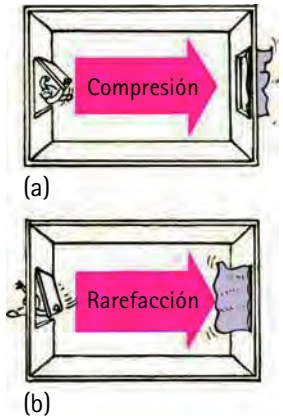



**FIGURA 20.1**
(a) Cuando la puerta se abre, una compresión viaja por toda la habitación. (b) Cuando la puerta se cierra, una rarefacción viaja por toda la habitación.

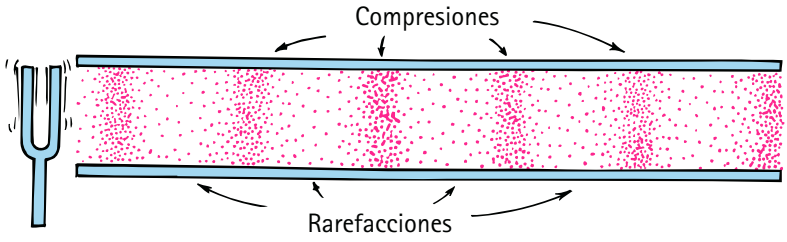


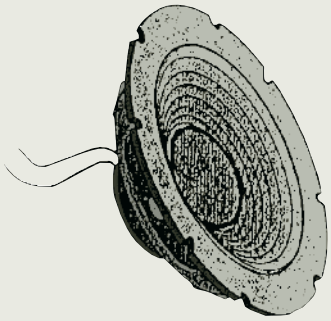

**FIGURA 20.2**
Las compresiones y las rarefacciones viajan (ambas con la misma rapidez y en la misma dirección) desde el diapasón a través del aire en el tubo.

**FIGURA 20.3**
Una raqueta de ping-pong que vibra en medio de bolas de ping-pong produce una vibración de las bolas.

**FIGURA 20.4**
Ondas de aire comprimido y rarificado, producidas por el cono en vibración de la bocina, constituyen el agradable sonido de la música.

## BOCINA

La bocina de tu radio u otro sistema de reproducción de sonido convierte señales eléctricas en ondas sonoras. Las señales eléctricas pasan a través de una bobina devanada alrededor del cuello de un cono de papel. Esta bobina, que actúa como un electroimán, se ubica cerca de un imán permanente. Cuando fluye corriente en una dirección, la fuerza magnética empuja el electroimán hacia el imán permanente, lo que jala al cono hacia adentro. Cuando la corriente fluye en la dirección opuesta, el cono se empuja hacia afuera. Las vibraciones en la señal eléctrica hacen que el cono vibre. Las vibraciones del cono producen, entonces, ondas sonoras en el aire. La física de las grandes bocinas se aplica a las pequeñas, incluso a las que caben en tu oído.



la habitación con movimientos ondulatorios. El mismo proceso ocurre con los audífonos de botón que utilizas con tu iPod u otro dispositivo en el que la bocina es tan pequeña que cabe en tu oído. El aire en vibración resultante pone a vibrar tu tímpano, que, a su vez, envía cascadas de impulsos eléctricos rítmicos a lo largo de la cóclea y hacia el cerebro. Y escuchas el sonido de la música.

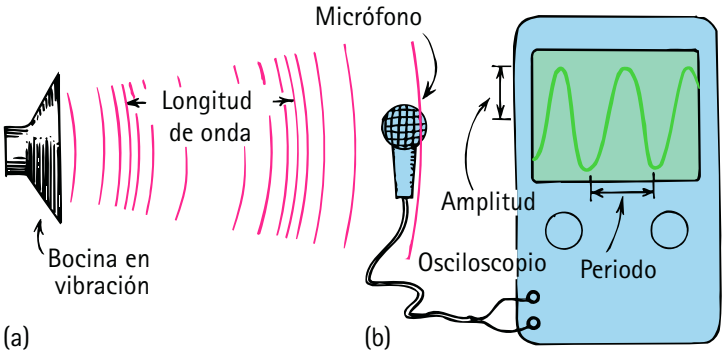



**FIGURA 20.5**
(a) Las vibraciones de la bocina del radio envían compresiones de aire (líneas rojas) y producen vibraciones similares en el micrófono, que se despliegan en un osciloscopio. (b) La forma de la onda sobre la pantalla del osciloscopio revela información acerca del sonido.

Tus dos oídos son tan sensibles a las diferencias de sonido que llega a ellos, que puedes decir desde qué dirección proviene el sonido con una precisión casi exacta. Con un solo oído, no tendrías ni idea (y, en una emergencia, podrías no saber en qué dirección saltar).

## Rapidez del sonido en el aire

Si observas a una persona cortar madera a cierta distancia, o a lo lejos ves a un jugador de béisbol golpear una pelota, puedes ver con facilidad que el golpe tiene lugar mucho antes de que el sonido llegue a tus oídos. De la misma manera que el trueno se escucha después de que ves el destello de un relámpago. Estas experiencias comunes muestran que el sonido necesita un tiempo considerable para viajar de un lugar a otro. La rapidez del sonido depende de las condiciones del viento, la temperatura y la humedad. No depende de la intensidad o la frecuencia del sonido; todos los sonidos en el mismo medio viajan con la misma rapidez. La rapidez del sonido en aire seco a 0°C es de alrededor de 330 metros por segundo, casi 1,200 kilómetros por hora (un poco más que una millonésima parte de la rapidez de la luz). El vapor de agua en el aire aumenta un poco esta rapidez. El sonido viaja más rápido por el aire caliente que por el aire frío. Esto es de esperar porque las moléculas que se mueven más rápido en el aire caliente rebotan entre sí con más frecuencia y, por tanto, pueden transmitir un pulso en menos tiempo.[2] Por cada grado que aumente la temperatura sobre 0°C, la rapidez del sonido en el aire aumenta en 0.6 m/s. De este modo, en aire a temperatura ambiente normal, de aproximadamente 20°C, el sonido viaja a cerca de 340 m/s.

[2]La rapidez del sonido en un gas es aproximadamente ¾ partes de la rapidez promedio de las moléculas del gas.

## PRACTICANDO LA FÍSICA

Suspende la rejilla de alambre de un refrigerador o un horno de una cuerda y sostén los extremos de la cuerda a tus oídos. Pide a un amigo que golpee en forma suave la rejilla con pajas de escoba y con otros objetos. El efecto se aprecia mejor cuando estás relajado y con los ojos cerrados. ¡Asegúrate de intentarlo!

### PUNTO DE CONTROL

1. **¿Las compresiones y las rarefacciones en una onda sonora viajan en la misma dirección o en direcciones opuestas unas de otras?**
2. **¿Cuál es la distancia aproximada de una tormenta cuando observas una demora de 3 s entre el destello de un relámpago y el sonido del trueno?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Viajan en la misma dirección (como se muestra en la Figura 20.1).
2. Si supones que la rapidez del sonido en el aire es de aproximadamente 340 m/s, en 3 s viajará 340 m/s $\times$ 3 s = 1,020 m. No hay demora considerable para el destello, así que la tormenta está a un poco más de 1 km de distancia.

## Energía en ondas sonoras

El movimiento ondulatorio de todo tipo posee energía de grados variables. Las ondas electromagnéticas del Sol, por ejemplo, proporcionan las enormes cantidades de energía que sostienen la vida sobre la Tierra. En comparación, el sonido tiene una cantidad de energía en extremo pequeña. Esto se debe a que para producir sonido se necesita sólo una pequeña cantidad de energía. Por ejemplo, si 10 millones de personas hablaran al mismo tiempo, producirían una energía sonora igual a sólo la energía necesaria para operar una linterna común. La audición sólo es posible debido a que tus oídos son muy sensibles. Sólo el micrófono más sensible puede detectar el sonido que es más suave de lo que puedes escuchar.

La energía sonora se disipa en energía térmica mientras el sonido viaja en el aire. En el caso de ondas de mayor frecuencia, la energía sonora se transforma en energía interna con más rapidez que para ondas de frecuencias más bajas. Como resultado, los sonidos de frecuencias bajas viajan más lejos por el aire que los sonidos de frecuencias más altas. Es por eso que las sirenas de niebla de los barcos son de frecuencia baja.

## 20.3 Reflexión del sonido

A la reflexión del sonido se le llama *eco*. La fracción de energía transportada por la onda sonora reflejada puede ser grande si la superficie es rígida y lisa, y menor si la superficie es blanda e irregular. La energía sonora no transportada por la onda sonora reflejada la transporta la onda "transmitida" (absorbida).

El sonido se refleja de una superficie lisa de la misma forma que lo hace la luz: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (Figura 20.6). En ocasiones, cuando el sonido se refleja de las paredes, el techo y el suelo de una habitación, las superficies reflejantes son muy reflectantes y el sonido se vuelve confuso. Cuando el

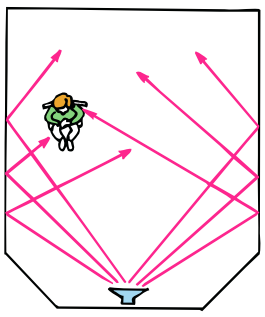
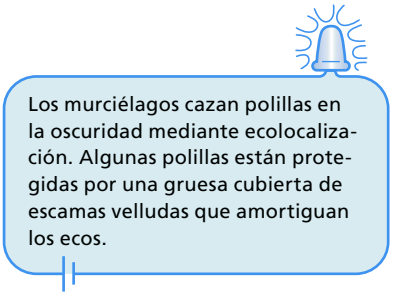


**FIGURA 20.6**
El ángulo del sonido incidente es igual al ángulo del sonido reflejado.

sonido experimenta múltiples reflexiones y persiste después de que la fuente deja de emitir, escuchas **reverberaciones**.

Por otra parte, si las superficies reflejantes son demasiado absorbentes, el nivel sonoro será bajo y la habitación sonará mitigada y sin vida. La reflexión del sonido en una habitación hace que suene vivo y pleno, como seguramente descubriste mientras cantabas en la ducha. En el diseño de un auditorio o una sala de conciertos, debe lograrse un equilibrio entre reverberación y absorción. El estudio de las propiedades del sonido se llama *acústica*.

Con frecuencia es conveniente colocar superficies muy reflejantes detrás del escenario para dirigir el sonido hacia el auditorio. En algunas salas de conciertos, las superficies reflejantes están suspendidas arriba del escenario. Con mucha frecuencia son grandes superficies plásticas brillantes que también reflejan luz (Figura 20.8). Un escucha puede observar estos reflectores y ver las imágenes reflejadas de los integrantes de la orquesta. Los reflectores plásticos son un poco curvos, lo que aumenta el campo de visión. Tanto el sonido como la luz obedecen la misma ley de reflexión, por lo que si un reflector se orienta de modo que puedas ver un instrumento musical en particular, ten por seguro que también lo escucharás. El sonido proveniente del instrumento seguirá la línea de visión hacia el reflector y luego hacia ti.



Los murciélagos cazan polillas en la oscuridad mediante ecolocalización. Algunas polillas están protegidas por una gruesa cubierta de escamas velludas que amortiguan los ecos.

**FIGURA 20.7**
Paredes esponjosas especiales absorben más que reflejan el sonido en esta habitación acústica.

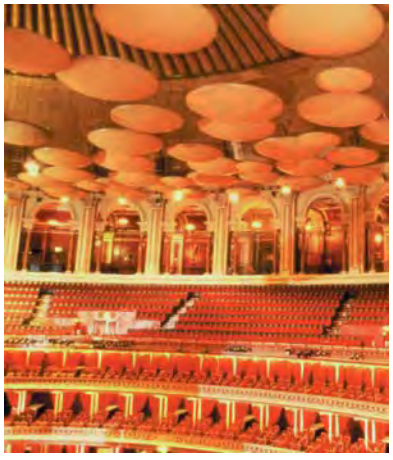


**FIGURA 20.8**
Las placas plásticas arriba de la orquesta reflejan tanto la luz como el sonido. Ajustarlas es bastante simple: lo que ves es lo que escuchas.

## 20.4 Refracción del sonido

**SCREENCAST: Reflexión y refracción del sonido**

Cuando las ondas sonoras continúan a través de un medio y se doblan, experimentan **refracción**. Las ondas sonoras se doblan cuando partes de los frentes de onda viajan con diferentes rapideces. Esto puede ocurrir en vientos disparejos o cuando el sonido viaja por el aire con temperaturas desiguales. En un día cálido, el aire cerca del suelo puede ser mucho más caliente que el resto del aire, de modo que la rapidez del sonido cerca del suelo aumenta (Figura 20.9). En consecuencia, las ondas sonoras tienden a doblarse y alejarse del suelo, lo que resulta en un sonido que parece no viajar bien. La refracción del sonido es provocada por diferencias en la rapidez del sonido.

Escuchas el trueno cuando el relámpago está razonablemente cerca, pero con frecuencia no escuchas el trueno de los relámpagos distantes debido a la refracción. El sonido viaja más lento a altitudes más altas y se dobla alejándose del suelo, de modo que no puedes escucharlo. Lo opuesto ocurre con frecuencia en un día frío o en una noche cuando la capa de aire cerca del suelo es más fría que el aire superior. Entonces se reduce la rapidez del sonido cerca del suelo. La mayor rapidez de los frentes de onda que están encima hace que el sonido se doble hacia el suelo, lo que resulta en un sonido

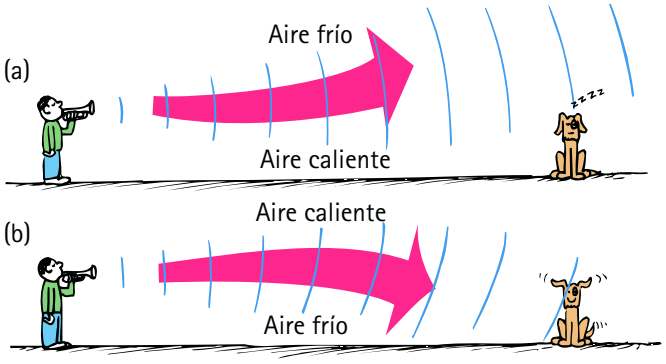



**FIGURA 20.9**
Las ondas sonoras se doblan en el aire a temperaturas distintas.

**VIDEO: Refracción del sonido**

que puede escucharse sobre distancias mucho más largas. La refracción del sonido explica por qué puedes escuchar con claridad conversaciones sobre una fogata lejana al otro lado de un lago en la noche. El sonido no siempre viaja en trayectorias rectas.

La refracción del sonido ocurre bajo el agua, donde la rapidez del sonido varía con la temperatura. Esto plantea un problema para las embarcaciones de superficie que hacen rebotar ondas de alta frecuencia en el fondo del océano para trazar las características del fondo marino. La refracción es una bendición para los submarinos que quieren escapar a la detección. Debido a los gradientes térmicos y las capas de agua a diferentes temperaturas, la refracción del sonido deja brechas o "puntos ciegos" en el agua. Es ahí donde se esconden los submarinos. Si no fuera por la refracción, los submarinos se detectarían con más facilidad.

Observa en la Figura 20.9 que las direcciones de las ondas sonoras (rojo) están en ángulos rectos respecto de los frentes de onda (azul).

El sonido compuesto de frecuencias más altas que el rango de audición humano es *ultrasonido*. Los médicos utilizan las múltiples reflexiones y refracciones de las ondas ultrasónicas en una técnica inocua para ver dentro del cuerpo sin el uso de rayos X. Cuando el ultrasonido entra en el cuerpo, se refleja con más fuerza desde el exterior de un órgano que desde su interior, y se obtiene una imagen del perfil del órgano. Cuando el ultrasonido incide sobre un objeto en movimiento, el sonido reflejado tiene una frecuencia un poco diferente. Con este efecto Doppler, un médico puede "ver" el latido del corazón de un feto con apenas 11 semanas de haber sido concebido (Figura 20.10).

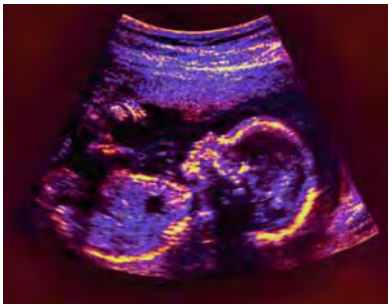


**FIGURA 20.10**
Un feto humano se muestra con claridad en una pantalla de visualización mediante ultrasonido.

El ultrasonido se utiliza en medicina para producir imágenes de órganos internos del cuerpo y bebés en el útero, y en la industria para detectar desperfectos en los metales. Aunque la técnica de eco ultrasónico puede ser relativamente nueva para el ser humano, es materia vieja para criaturas como los murciélagos y los delfines. Los murciélagos, por ejemplo, emiten chillidos ultrasónicos y localizan objetos mediante sus ecos. Los delfines hacen esto y más. Mientras que el sonido es un sentido pasivo para el ser humano, es un sentido activo para el delfín que envía sonidos y luego percibe su entorno sobre la base de sus ecos. Percibir ondas ultrasónicas permite a un delfín "ver" a través de los cuerpos de otros animales y personas. La piel, el músculo y la grasa son casi transparentes para los delfines, de modo que ellos sólo "ven" un delgado perfil del cuerpo —pero los huesos, los dientes y las cavidades llenas de gas son claramente

**FIGURA 20.11**
Un delfín emite sonido de ultraalta frecuencia para localizar e identificar objetos en su entorno. La distancia la perciben por la demora temporal entre el sonido enviado y la recepción de su eco, y la dirección se percibe mediante las diferencias en el tiempo que le toma al eco llegar a sus dos oídos. La principal dieta de un delfín es el pescado y, dado que la audición de los peces está limitada a frecuencias bastante bajas, los peces no son alertados de que serán cazados.

evidentes—. La evidencia física de cánceres, tumores, ataques cardiacos e incluso estados emocionales pueden "verlas" los delfines:[3] el ser humano apenas pudo lograrlo con el ultrasonido en fecha reciente.

**PUNTO DE CONTROL**

**Una embarcación sondea el fondo marino con sonido ultrasónico que viaja a un promedio de 1,530 m/s en agua de mar. ¿Qué tan profunda es el agua si la demora temporal del eco desde el suelo marino es de 2 s?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

1,530 m (1 s para bajar y 1 s para subir).

## 20.5 Vibraciones forzadas

Si golpeas un diapasón no montado, el sonido proveniente de él puede ser más bien desvanecido. Si sostienes el mismo diapasón en una mesa después de golpearlo, el sonido es más fuerte. Esto se debe a que la mesa es forzada a vibrar y, con su área superficial más grande, la mesa pone más aire en movimiento. La mesa puede ponerse a vibrar por un diapasón de cualquier frecuencia, un caso de **vibración forzada**. El mecanismo en una caja de música se monta sobre una caja de resonancia. Sin la caja de resonancia, el sonido producido por el mecanismo de la caja de música es apenas audible. Las cajas de resonancia son importantes en todos los instrumentos musicales de cuerda.

### Frecuencia natural

Cuando alguien suelta una llave de tuercas sobre un piso de concreto, seguro que no confundes su sonido con el de un bate de béisbol que golpea el suelo. Esto se debe a que los dos objetos vibran de manera diferente cuando son golpeados. Golpea una llave de tuercas y las vibraciones que produce son diferentes a las vibraciones de un bate de béisbol, o de cualquier otra cosa. Cualquier objeto compuesto de un material elástico, cuando se perturba, vibrará a su propio conjunto especial de frecuencias, que en conjunto forman su sonido único. Se habla de la **frecuencia natural**, de un objeto, que depende de factores como la elasticidad y la forma del objeto. Desde luego, campanas y diapasones vibran a sus propias frecuencias características. Y es muy interesante que la mayoría de las cosas, desde los planetas hasta los átomos, y casi todo lo demás entre ellos, tengan una elasticidad propia y vibren a una o más frecuencias naturales.

**FIGURA 20.12**
La frecuencia natural de la campana más pequeña es mayor que la de la campana más grande, y tañe en una altura mayor.

## 20.6 Resonancia

Cuando la frecuencia de las vibraciones forzadas sobre un objeto coincide con la frecuencia natural del objeto, ocurre un drástico aumento en la amplitud. Este fenómeno se llama **resonancia**. Literalmente, *resonancia* significa "volver a sonar", o "sonar de nuevo". La masilla no resuena porque no es elástica, y un pañuelo que se suelta es demasiado flojo. Para que algo resuene, necesita una fuerza que lo regrese a su posición de partida y suficiente energía que lo mantenga vibrando.

**SCREENCAST: Resonancia del sonido**

[3]El sentido más importante del delfín es acústico, porque la visión no es un sentido muy útil en las profundidades marinas, con frecuencia turbias y oscuras. Lo que es más interesante: el delfín puede reproducir las señales sónicas que pintan la imagen mental de sus alrededores; por ende, es probable que para comunicar su experiencia a otros delfines, comunique toda la imagen acústica de lo que "ve", y la coloque directamente en las mentes de otros delfines. Un delfín no necesita palabras o símbolos para "pez", por ejemplo, sino que comunica una imagen de la cosa real, quizás con un énfasis destacado mediante un filtrado selectivo, de la misma manera como uno comunica un concierto musical a otros a través de varios medios de reproducción sonora. ¡Pequeña maravilla que el lenguaje del delfín sea muy distinto al del ser humano!

Una experiencia frecuente que ilustra la resonancia ocurre en un columpio. Cuando empujas un columpio, lo empujas en ritmo con la frecuencia natural del balanceo. Más importante que la fuerza con la que empujas es el tiempo. Incluso pequeños empujones de alguien más, si se suministran en ritmo con la frecuencia natural del movimiento del balanceo, producen grandes amplitudes. Una demostración común de la resonancia en el salón de clase consiste en ajustar un par de diapasones a la misma frecuencia y separarlos más o menos un metro. Cuando uno de los diapasones se golpea, éste pone a vibrar al otro diapasón (Figura 20.13). Ésta es una versión a pequeña escala de empujar a un amigo en un columpio: el tiempo es lo que importa. Cuando una serie de ondas sonoras choca con el diapasón, cada compresión da al brazo del diapasón un pequeño empujón. Dado que la frecuencia de dichos empujones corresponde a la frecuencia natural del diapasón, los empujones aumentan de manera sucesiva la amplitud de la vibración. Esto se debe a que los empujones suceden en el momento apropiado y ocurren repetidas veces en la misma dirección que el movimiento instantáneo del diapasón. El movimiento del segundo diapasón con frecuencia se denomina *vibración simpática*.

Si los diapasones no se ajustan para frecuencias coincidentes, el momento de los empujones está fuera de lugar y no ocurrirá resonancia. Cuando sintonizas un radio, de igual modo ajustas la frecuencia natural de la electrónica para que coincida con una de las muchas señales circundantes. Entonces el conjunto resuena en una estación a la vez en lugar de reproducir todas las estaciones al mismo tiempo.

**FIGURA 20.13**
Cuando Ryan Patterson golpea uno de los diapasones de frecuencia coincidente, el otro se pone en resonancia.

**VIDEO: Resonancia**

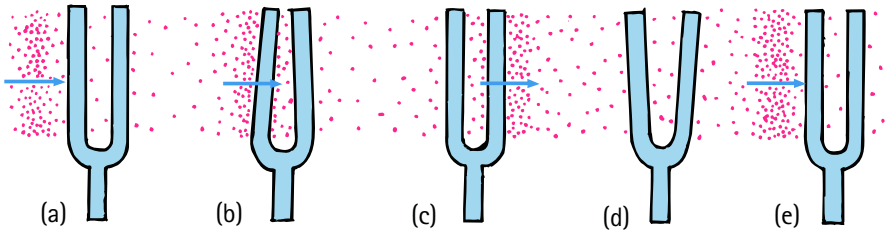



**FIGURA 20.14**
Etapas de la resonancia (las flechas azules indican ondas sonoras que viajan hacia la derecha). (a) La primera compresión encuentra al diapasón y le produce un pequeño y momentáneo empujón. (b) El diapasón se dobla y luego (c) regresa a su posición inicial justo en el momento cuando llega una rarefacción y (d) llega más allá en la dirección opuesta. Justo cuando el diapasón regresa a su posición inicial (e), llega la siguiente compresión para repetir el ciclo. Ahora el diapasón se dobla más porque está en movimiento.

La resonancia ocurre siempre que se aplican impulsos sucesivos a un objeto en vibración, en ritmo con su frecuencia natural. Las tropas de caballería que marchaban por un puente cerca de Manchester, Inglaterra, en 1831, provocaron sin querer el colapso del puente cuando marcharon en ritmo con la frecuencia natural del puente. Desde entonces, se acostumbra ordenar a las tropas "romper el paso" cuando cruzan puentes, para evitar la resonancia. Un siglo más tarde, otro gran desastre en puentes fue producido por una resonancia causada por el viento (Figura 20.15).

**FIGURA 20.15**
En 1940, cuatro meses después de haber sido terminado, el puente Tacoma Narrows, en el estado de Washington, fue destruido por resonancia generada por el viento. Un ligero vendaval produjo una fuerza irregular en resonancia con la frecuencia natural del puente, lo que aumentó de manera constante la amplitud de vibración hasta que el puente colapsó.

**VIDEO: Resonancia y puentes**

**FIGURA 20.16**
Manuel descubre que produce una gran amplitud cuando empuja en ritmo con la frecuencia natural del columpio.

Los efectos de la resonancia están en todo tu entorno. La resonancia acentúa no sólo el sonido de la música, sino también el color de las hojas en el otoño, la altura de las mareas oceánicas, el funcionamiento de los láseres y una gran multitud de fenómenos que se suman a la belleza del mundo.

## 20.7 Interferencia

**SCREENCAST:** Interferencia de ondas

Las ondas sonoras, al igual que cualquier onda, pueden presentar **interferencia**. Recuerda que la interferencia de ondas se estudió en el Capítulo 19. En la Figura 20.17 se muestra una comparación entre la interferencia en ondas transversales y en ondas longitudinales. En cualquier caso, cuando las crestas de una onda se traslapan con las crestas de otra onda, resulta un aumento de amplitud. O, cuando la cresta de una onda se traslapa con el valle de otra onda, resulta una reducción de amplitud. En el caso del sonido, la cresta de una onda corresponde a una compresión y el valle de una onda corresponde a una rarefacción. La interferencia sucede con todas las ondas, tanto transversales como longitudinales.

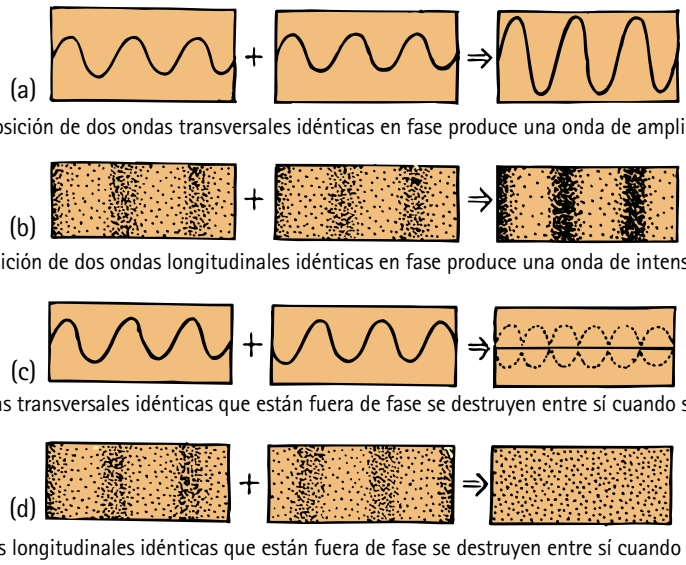



**FIGURA 20.17**
Interferencia de onda constructiva (a,b) y destructiva (c,d) en ondas transversales y longitudinales.

Un caso interesante de interferencia de sonido se ilustra en la Figura 20.18. Si estás a igual distancia de dos bocinas que emiten tonos idénticos de frecuencia fija, el sonido es más intenso porque se suman los efectos de las dos bocinas. Las compresiones y las rarefacciones de los tonos llegan de forma sincronizada, o *en fase*. Sin embargo, si tú o una bocina se mueven a un lado, de modo que las distancias de las bocinas hacia ti difieran por media longitud de onda, entonces las rarefacciones de una bocina se llenan con las compresiones provenientes de la otra bocina. Esto es interferencia destructiva. Es como si la cresta de una ola llenara exactamente el valle de otra ola, con lo que se cancelan ambas. Si la región está desprovista de cualquier superficie reflejante, ¡se escuchará poco o ningún sonido!

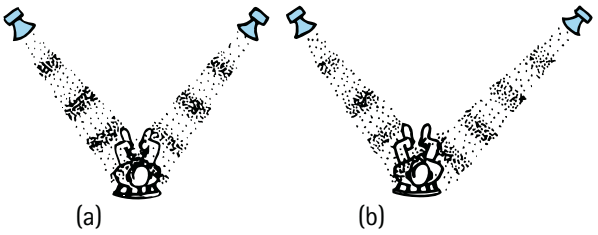



**FIGURA 20.18**
Interferencia de ondas sonoras.
(a) Las ondas llegan en fase e interfieren de modo constructivo cuando las longitudes de las trayectorias desde las bocinas son iguales.
(b) Las ondas llegan fuera de fase e interfieren de modo destructivo cuando las longitudes de las trayectorias difieren en media longitud de onda (o 3/2, 5/2, etcétera).

Si las bocinas emiten todo un rango entero de sonidos con distintas frecuencias, sólo algunas ondas interfieren de modo destructivo para una diferencia dada en las longitudes de las trayectorias. Entonces, la interferencia de este tipo no suele ser un problema, porque en general hay suficiente reflexión de sonido para llenar los puntos cancelados. No obstante, los "puntos ciegos" en ocasiones son evidentes en teatros o salas de concierto con diseños deficientes, donde las ondas sonoras se reflejan en las paredes e interfieren con las ondas no reflejadas y producen zonas de baja amplitud. Cuando mueves la cabeza unos centímetros en cualquier dirección, puedes escuchar una diferencia considerable.

La interferencia sonora se ilustra de manera sorprendente cuando el sonido monoaural se reproduce en bocinas estéreo que están fuera de fase. Las bocinas están fuera de fase cuando los alambres de entrada a una bocina se intercambian (se invierten los alambres de entrada positivo y negativo). Para una señal monoaural, esto significa que, cuando una bocina envía una compresión de sonido, la otra envía una rarefacción. El sonido producido no es tan pleno ni tan intenso como el proveniente de bocinas conectadas

adecuadamente en fase, porque las ondas más largas se cancelan por interferencia. Esto se ilustra en la Figura 20.19. Las ondas más cortas se cancelan a medida que las bocinas se acercan, y cuando el par de bocinas se pone frente a frente una contra otra, ¡se escucha muy poco sonido! Sólo las ondas sonoras que tienen las frecuencias más altas sobreviven a la cancelación. Tienes que intentarlo para apreciarlo.

**FIGURA 20.19**
Si se intercambian los alambres de entrada positivo y negativo de una de las bocinas estéreo, las bocinas están fuera de fase. Cuando las bocinas están separadas, el sonido monoaural no es tan intenso como el proveniente de las bocinas en fase apropiada. Cuando se ponen frente a frente, se escucha muy poco sonido. ¡La interferencia es casi completa conforme las compresiones de una bocina llenan las rarefacciones de la otra!

La interferencia sonora destructiva es una propiedad útil en la *tecnología antirruido*. Los dispositivos ruidosos, como los martillos neumáticos, están equipados con micrófonos que envían el sonido del dispositivo a microchips electrónicos que crean imágenes especulares de los patrones de onda de las señales sonoras. Para el martillo neumático, esta señal sonora especular se alimenta a audífonos que utiliza el operador. Las compresiones (o rarefacciones) sonoras del martillo se cancelan mediante rarefacciones (o compresiones) especulares en los audífonos. La combinación de señales cancela el ruido del martillo neumático. Los audífonos antirruido ya son comunes para los pilotos (como los que usa Ken, fotografiado al comienzo de este capítulo). Las cabinas de algunos aviones ahora se silencian con tecnología antirruido. Cuando no se silencian, debes usar tus audífonos antirruido.

**PUNTO DE CONTROL**

**En la demostración de la Figura 20.19, ¿por qué es importante usar sonido monoaural?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Puedes cancelar las señales si son idénticas, no las diferentes señales que alimentan las bocinas estéreo. Señales idénticas alimentadas a ambas bocinas producen un sonido monoaural, justo lo que necesitas para máxima interferencia destructiva cuando cambias las fases de las señales monoaurales.

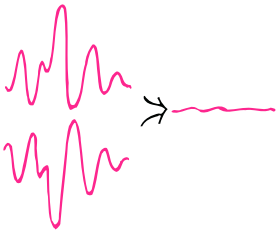


**FIGURA 20.20**
Cuando una imagen especular de una señal sonora se combina con el sonido en sí, el sonido se cancela.

## 20.8 Batimientos

Cuando suenan juntos dos tonos con una frecuencia un poco diferente, se escucha una fluctuación en la intensidad de los sonidos combinados; el sonido es intenso, luego débil, luego intenso, luego débil y así sucesivamente. Esta variación periódica en la intensidad del sonido se llama **batimiento** y se debe a la interferencia. Golpea dos diapasones ligeramente no coincidentes y, dado que un diapasón vibra con diferente frecuencia que el otro, las vibraciones de los diapasones por un momento estarán en fase, luego fuera de fase, luego en fase de nuevo y así sucesivamente. Cuando las ondas combinadas llegan a tus oídos en fase (por decir, cuando una compresión de un diapasón se traslapa con una compresión del otro) el sonido es un máximo. Un momento después, cuando los diapasones están fuera de fase, una compresión de un diapasón se encuentra con una rarefacción del otro, lo que resulta en un mínimo. El sonido que llega a tus oídos palpita entre una intensidad máxima y una mínima y produce un efecto trémolo.

**VIDEO: Interferencia y batimientos**

Para entender los batimientos, piensa en un conejo alto y un conejo bajo que saltan lado a lado. El conejo bajo cubre menos terreno en cada salto, de modo que debe saltar con más rapidez; esto es, con mayor frecuencia, para mantener el paso del conejo alto. Si los conejos están "en sincronía" en un momento particular, aterrizan juntos, luego, un poco después, estarán "fuera de sincronía", y aterrizarán en momentos un poco diferentes. ¿Cuánto tiempo transcurrirá hasta que vuelvan a estar en sincronía? Imagina

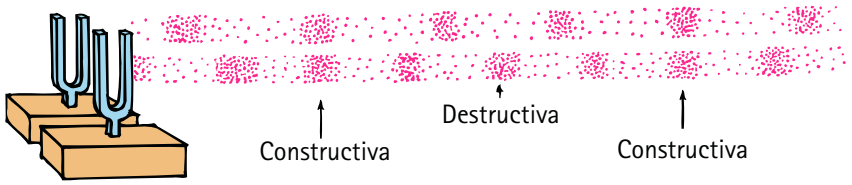



**FIGURA 20.21**
La interferencia de dos fuentes sonoras con frecuencias un poco diferentes produce batimientos.

**FIGURA 20.22**
Los desiguales espaciamientos de los peines producen un patrón de Moiré que es similar a los batimientos.

que el conejo alto da 70 saltos en 1 minuto, y que el conejo más bajo da 72 saltos en el mismo tiempo. Después de 6 segundos (0.1 min) habrán dado 7 y 7.2 saltos, respectivamente, y no estarán en sincronía. No es sino hasta que hayan transcurrido 30 segundos (0.5 min), cuando hayan dado, respectivamente, 35 y 36 saltos (un número entero para ambos), que aterrizarán juntos de nuevo. Luego, después de 1 minuto (70 y 72 saltos), estarán de nuevo en sincronía. Y así sucesivamente. Dos veces por minuto los conejos estarán en sincronía. En general, si dos criaturas con diferentes tasas de salto viajan juntas, el número de veces que están en sincronía cada minuto (u otra unidad de tiempo) será igual a la diferencia en las frecuencias de sus saltos. Esta idea también se aplica al par de diapasones. Si un diapasón experimenta 264 vibraciones cada segundo y el otro diapasón vibra 262 veces por segundo, entonces vibrarán en sincronía y se reforzarán entre sí dos veces cada segundo. Se escuchará una frecuencia de batimiento de 2 hertz. (La altura global corresponderá a la frecuencia promedio, 263 hertz.)

Si encimas dos peines con diferente espaciamiento entre los dientes, verás un patrón de Moiré que se relaciona con los batimientos (Figura 20.22). El número de batimientos por longitud será igual a la diferencia en el número de dientes por longitud para los dos peines.

Los batimientos pueden ocurrir con cualquier tipo de onda y constituyen una forma práctica de comparar frecuencias. Para afinar un piano, por ejemplo, un afinador de pianos escucha los batimientos producidos entre una frecuencia estándar y la frecuencia de una cuerda particular en el piano. Cuando las frecuencias son idénticas, los batimientos desaparecen. Los batimientos pueden ayudarte a afinar varios instrumentos musicales. Tan sólo escucha los batimientos entre el tono de tu instrumento y un tono estándar producido por un piano o algún otro instrumento.

## TRANSMISIONES DE RADIO

Un receptor de radio convierte ondas electromagnéticas, que no puedes escuchar, en ondas sonoras que puedes escuchar. Toda estación de radio tiene una frecuencia asignada en la cual transmite. La onda electromagnética transmitida a esta frecuencia es la *onda portadora*. La señal sonora que se va a transmitir tiene una frecuencia relativamente baja y se superpone sobre la onda portadora con una frecuencia mucho mayor en dos formas principales: mediante ligeras variaciones en la amplitud que coinciden con la frecuencia de audio o mediante ligeras variaciones en la frecuencia. Esta impresión de la onda sonora sobre la onda de radio de mayor frecuencia es la *modulación*. Cuando se modula la *amplitud* de la onda portadora, se le llama AM, o *amplitud modulada*. Las estaciones AM transmiten en el intervalo de 535-1,605 kilohertz. Cuando se modula la *frecuencia* de la onda portadora, se le llama FM, o *frecuencia modulada*. Las estaciones FM transmiten en el intervalo de mayor frecuencia de 88-108 megahertz. La amplitud modulada es similar a cambiar rápidamente el brillo de una bombilla de color constante. La frecuencia modulada es como cambiar rápidamente el color de una bombilla de intensidad constante.

Girar la perilla de un receptor de radio para seleccionar una estación particular es como ajustar masas móviles sobre los brazos de un diapasón para hacerlo resonar con el sonido producido por otro diapasón. Cuando eliges una estación de radio, ajustas la frecuencia de un circuito eléctrico dentro del receptor de radio para hacerlo coincidir y resonar con la frecuencia de la estación deseada. Eliges una onda portadora de entre muchas. Entonces la señal sonora impresa se separa de la onda portadora, se amplifica y alimenta la bocina. ¡Es bueno escuchar sólo una estación a la vez!

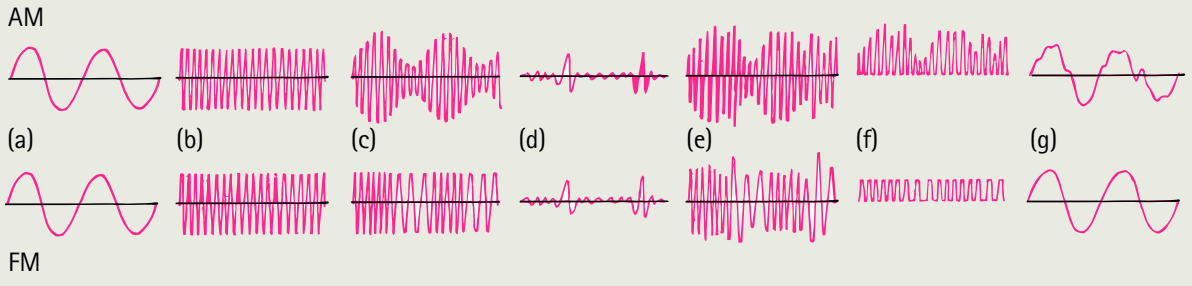



**FIGURA 20.23**
Señales de radio AM y FM. (a) Ondas sonoras que entran en un micrófono. (b) Onda portadora de radiofrecuencia producida por un transmisor sin una señal sonora. (c) Onda portadora modulada por la señal. (d) Interferencia estática. (e) Onda portadora y señal afectada por estática. (f) El receptor de radio corta la mitad negativa de la onda portadora. (g) La señal restante es rugosa para AM debido a la estática, pero es lisa para FM porque las puntas de la forma de onda se cortan sin pérdida de señal.

Los delfines utilizan los batimientos para sondear los movimientos de las cosas que los rodean. Cuando un delfín envía señales sonoras, pueden producirse batimientos cuando los ecos que recibe el delfín interfieren con el sonido que envía. Cuando no hay movimiento relativo entre el delfín y el objeto que regresa el sonido, las frecuencias enviada y recibida son iguales y no ocurren batimientos. Pero cuando hay movimiento relativo, el eco tiene una frecuencia diferente debido al efecto Doppler, y se producen batimientos cuando se combinan el eco y el sonido emitido. El mismo principio se aplica en las pistolas de radar que utilizan los oficiales de policía. Los batimientos entre la señal que envían y la que se refleja permiten determinar la rapidez de un automóvil.

Una aplicación intrigante de los batimientos, y que salva vidas, se usa en la detección de gases peligrosos en las minas. El aire en algunas minas contiene metano venenoso. Existe una pequeña diferencia en la rapidez del sonido en aire puro y en el aire que contiene metano. Cuando un par de pequeños tubos idénticos se soplan juntos, uno con aire puro de un depósito y el otro con el aire de la mina, se escuchan batimientos si el aire contiene metano. Si trabajas en una mina, ¡hazlo en una donde no se escuchen batimientos cuando realices este procedimiento!

¿Por qué Hollywood sigue reproduciendo ruidos de motor siempre que una nave espacial se mueve en el espacio exterior? ¿No sería mucho más espectacular verlas flotar en silencio?

## PUNTO DE CONTROL

1. **¿Cuál es la frecuencia de batimiento cuando suenan juntos un diapasón de 262 Hz y uno de 266 Hz? ¿Uno de 262 Hz y uno de 272 Hz?**
2. **¿Es correcto decir que, en todos los casos, sin excepción, cualquier onda de radio viaja más rápido que cualquier onda sonora?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Para los diapasones de 262 Hz y 266 Hz, el oído escuchará 264 Hz, que batirán a 4 Hz (266 Hz – 262 Hz). Para los diapasones de 262 Hz y 272 Hz, se escucharán 267 Hz, y algunas personas lo escucharán vibrar 10 veces cada segundo (272 Hz – 262 Hz). Las frecuencias de batimiento mayores que 10 Hz por lo general son demasiado rápidas para ser escuchadas.
2. Sí, porque cualquier onda de radio es una onda electromagnética y viaja con la rapidez de la luz. Una onda sonora, por otra parte, es una onda mecánica que viaja en el aire a unos 340 m/s, alrededor de una millonésima la rapidez de una onda de radio. De modo que cualquier onda de radio viaja mucho más rápido que cualquier onda sonora.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Altura (tono).** Lo alto o lo bajo de un tono; relacionado con la frecuencia de la onda.

**Infrasónico.** Describe un sonido que tiene una frecuencia muy baja para ser escuchada por el oído humano normal.

**Ultrasónico.** Describe un sonido que tiene una frecuencia muy alta para ser escuchada por el oído humano normal.

**Compresión.** Región condensada del medio a través del cual viaja una onda longitudinal.

**Rarefacción.** Región rarificada (de presión reducida) del medio a través del cual viaja una onda longitudinal.

**Reverberación.** Persistencia del sonido, como en un eco, debida a reflexiones múltiples.

**Refracción.** Doblamiento del sonido o cualquier onda causado por una diferencia en las rapideces de onda.

**Vibración forzada.** Establecimiento de vibraciones en un objeto mediante una fuerza de vibración.

**Frecuencia natural.** Frecuencia a la cual un objeto elástico tiende a vibrar cuando se le perturba y se retira la fuerza perturbadora.

**Resonancia.** Respuesta de un cuerpo cuando una frecuencia forzada coincide con su frecuencia natural.

**Interferencia.** Resultado de superponer diferentes ondas, a menudo de la misma longitud de onda. La interferencia constructiva resulta del reforzamiento entre cresta y cresta; la interferencia destructiva resulta de la cancelación entre una cresta y un valle.

**Batimientos.** Serie de reforzamientos y cancelaciones alternados producidos por la interferencia de dos ondas con frecuencias un poco diferentes, que se escucha como un efecto de palpitación en ondas sonoras.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 20.1 La naturaleza del sonido

1. ¿Cómo se relaciona el sonido con la energía?
2. ¿Cuál es la relación entre la frecuencia y altura?
3. ¿Cuál es el rango promedio de audición de una persona joven?
4. Distingue entre ondas sonoras infrasónicas y ultrasónicas.
5. En relación con los sólidos y los líquidos, ¿cómo se clasifica el aire como conductor del sonido?
6. ¿Por qué el sonido no viaja en el vacío?

### 20.2 El sonido en el aire

7. Distingue entre una compresión y una rarefacción.
8. ¿Las compresiones y las rarefacciones viajan en la misma dirección, o en dirección opuesta, en una onda?
9. ¿De qué factores depende la rapidez del sonido? ¿Cuáles son algunos factores de los que *no* depende?
10. ¿Cuál es la rapidez del sonido en aire seco a 20°C?
11. ¿El sonido viaja más rápido en aire caliente que en aire frío?
12. ¿Usualmente qué es mayor: la energía en el sonido ordinario o la energía en la luz ordinaria?
13. A final de cuentas, ¿en qué se convierte la energía del sonido en el aire?

### 20.3 Reflexión del sonido

14. ¿Qué es un eco?
15. ¿Qué es una reverberación?

### 20.4 Refracción del sonido

16. ¿Cuál es la causa de la refracción?
17. ¿El sonido tiende a doblarse hacia arriba o hacia abajo cuando su rapidez es menor cerca del suelo?
18. ¿Por qué el sonido a veces se refracta bajo el agua?
19. ¿Qué es el ultrasonido?

### 20.5 Vibraciones forzadas

20. ¿Por qué un diapasón golpeado suena más fuerte cuando se sostiene en una mesa?
21. Indica al menos dos factores que determinen la frecuencia natural de un objeto.

### 20.6 Resonancia

22. ¿Cómo es que las vibraciones forzadas se relacionan con la resonancia?
23. Cuando escuchas el radio, ¿por qué sólo escuchas una estación a la vez en lugar de escuchar todas las estaciones al mismo tiempo?
24. ¿Cómo es que la resonancia generada por el viento afectó el puente Tacoma Narrows en el estado de Washington en 1940?

### 20.7 Interferencia

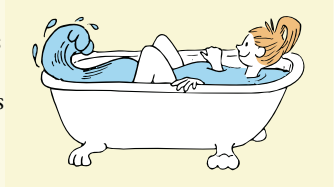
25. ¿Cuándo es posible que una onda cancele a otra?
26. ¿Qué tipo de ondas pueden mostrar interferencia?
27. ¿Cuál es el resultado de que una imagen especular de una señal de sonido se combine con el sonido original?

### 20.8 Batimientos

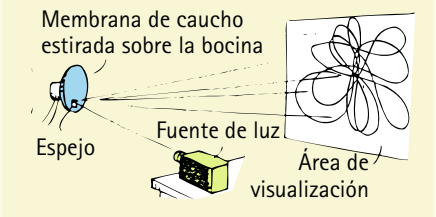
28. ¿Qué fenómeno físico sirve de base a la producción de batimientos?
29. ¿Qué frecuencia de batimiento ocurrirá cuando suenen juntas fuentes sonoras de 370 Hz y 374 Hz?
30. ¿Cómo difiere una onda de radio de una onda sonora?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

31. En la tina, sumerge la cabeza y escucha el sonido que haces cuando chocas las uñas o golpeas la tina bajo la superficie del agua. Compara con el sonido que haces cuando tanto la fuente como tus oídos están arriba del agua. Con el riesgo de mojar el suelo, deslízate de ida y vuelta en la tina con diferentes frecuencias y observa cómo la amplitud de las ondas de desplazamiento se acumula con rapidez cuando te deslizas al ritmo de las ondas. (El último proyecto es más efectivo cuando estás solo en la tina.)



32. Coloca un trozo de globo de caucho, no muy estirado, sobre la bocina de un radio. Pega un pequeño espejo muy ligero, papel aluminio o metal pulido cerca de uno de los bordes. Proyecta un estrecho haz de luz sobre el espejo mientras suena tu música favorita y observa los hermosos patrones que se reflejan sobre una pantalla o la pared.



## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

33. ¿Cuál es la longitud de onda de un tono de 340 Hz en aire a temperatura ambiente? ¿Cuál es la longitud de onda de una onda ultrasónica de 34,000 Hz en el mismo aire?
34. Durante años, los científicos marinos estuvieron desconcertados por las ondas sonoras detectadas con micrófonos submarinos en el Océano Pacífico. Las llamadas ondas T estaban entre los sonidos más puros de la naturaleza. Con el tiempo, los científicos rastrearon la fuente y la encontraron en los volcanes submarinos, cuyas columnas de burbujas ascendentes resonaban como los tubos de un órgano. ¿Cuál es la longitud de onda de una onda T típica cuya frecuencia es de 7 Hz? (La rapidez del sonido en agua de mar es 1,530 m/s.)
35. Una embarcación que explora las profundidades oceánicas sondea el suelo marino con ondas ultrasónicas que viajan a 1,530 m/s en agua de mar. La demora temporal del eco hacia el fondo marino y de vuelta es de 6 s. Demuestra que la profundidad del agua directamente abajo de la embarcación es de 4,590 m.
36. Un murciélago que vuela en una cueva emite un sonido y recibe su eco 0.1 s después. Demuestra que su distancia respecto de la pared de la cueva es de 17 m.
37. Observas a la distancia a Sally Constructora clavando clavos en un porche frontal a una tasa regular de 1 golpe por segundo. Escuchas el sonido de los golpes sincronizados de manera exacta con los golpes que ves. Y luego escuchas un golpe más después de ver que deja de martillar. Explica cómo calculas que Sally está a 340 m de distancia de ti.
38. Imagina a alguien con el tipo de Rip van Winkle que vive en un valle. Justo antes de irse a dormir, grita "DESPIERTA", y el sonido hace eco en la montaña más cercana y regresa 8 horas después. Demuestra que la distancia entre Rip y la montaña imaginaria es de casi 5,000 km (aproximadamente la distancia de Nueva York a San Francisco).
39. ¿Qué frecuencias de batimiento son posibles con diapasones de frecuencias de 256, 259 y 261 Hz?
40. Una marsopa gruñidora emite sonido a 57 Hz. ¿Cuál es la longitud de onda de este sonido en agua, donde la rapidez del sonido es de 1,500 m/s?

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

41. Clasifica la rapidez del sonido a través de estos materiales, de mayor a menor:
    a. Aire
    b. Acero
    c. Agua
42. Clasifica la frecuencia de batimiento, de la más alta a la más baja, para los siguientes pares de sonidos:
    a. 132 Hz, 136 Hz
    b. 264 Hz, 258 Hz
    c. 528 Hz, 531 Hz
    d. 1,056 Hz, 1,058 Hz

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

43. ¿Por qué no escuchas el sonido de los fuegos artificiales distantes hasta después de haberlos visto?
44. Si la Luna explotara, ¿por qué no lo escucharías?
45. ¿Por qué sería inútil tratar de detectar sonidos de otros planetas, incluso con los mejores detectores de audio?
46. Si lanzas una piedra en agua apacible, se forman círculos concéntricos. ¿Qué forma tendrán las ondas si lanzas una piedra en agua que fluye suavemente?
47. ¿Por qué zumban las abejas que vuelan?
48. Un gato puede escuchar frecuencias sonoras de hasta 70,000 Hz. Los murciélagos envían y reciben chillidos de ultraalta frecuencia de hasta 120,000 Hz. ¿Cuáles escuchan un sonido con longitudes de onda más cortas: los gatos o los murciélagos?
49. ¿Qué significa decir que una estación de radio está "en el 101.1 de tu sintonizador FM"?
50. Supón que una onda sonora y una onda electromagnética tienen la misma frecuencia. ¿Cuál tiene la longitud de onda más larga?
51. El sonido proveniente de la fuente A tiene el doble de frecuencia que el sonido de la fuente B. Compara las longitudes de onda del sonido proveniente de las dos fuentes.
52. ¿Qué ocurre con la longitud de onda del sonido cuando aumenta la frecuencia?
53. En las gradas de una pista de carreras, observas el humo de la pistola de salida antes de escuchar el disparo. Explica.
54. En las competencias olímpicas, un micrófono detecta el sonido de la pistola de salida y la envía eléctricamente a las bocinas del bloque de salida de cada corredor. ¿Por qué?
55. Cuando una onda sonora pasa por un punto en el aire, ¿hay cambios en la densidad del aire en este punto? Explica.
56. En el instante en que se crea una región de presión alta justo afuera de los brazos de un diapasón en vibración, ¿que se creará adentro, entre los brazos?
57. ¿Por qué después de una nevada todo parece tan callado?
58. Si una campana tañe dentro de una campana de vidrio, ya no puedes escucharla cuando se vacía el aire, pero todavía puedes verla. ¿Qué diferencias en las propiedades del sonido y de la luz indica esto?
59. ¿Por qué la Luna se describe como un "planeta silencioso"?
60. Si la rapidez del sonido dependiera de su frecuencia, ¿disfrutarías un concierto sentado en el segundo balcón? Explica.
61. Si la frecuencia del sonido se duplica, ¿qué cambio ocurrirá en su rapidez? ¿En su longitud de onda?
62. ¿Por qué el sonido viaja más lento en el aire frío que en el aire caliente?

63. ¿La refracción del sonido sería posible si la rapidez del sonido no se modificara con el viento, la temperatura y otras condiciones? Defiende tu respuesta.
64. ¿Por qué el temblor del suelo por una explosión distante puede sentirse antes de poder escuchar el sonido de la explosión?
65. ¿Qué tipo de condiciones de viento harían que el sonido se escuchara con más facilidad a largas distancias? ¿Qué se escuchará con menos facilidad a largas distancias?
66. Si la distancia respecto de un clarín se triplica, ¿en qué factor disminuye la intensidad del sonido? Supón que no hay reflexiones que afecten el sonido.
67. ¿Por qué un eco es más débil que el sonido original?
68. Si una sola perturbación a una distancia desconocida emite ondas tanto transversales como longitudinales que viajan con rapideces evidentemente diferentes en el medio, como en el suelo durante un terremoto, ¿cómo puede determinarse la distancia respecto de la perturbación?
69. ¿Qué par de errores físicos ocurren en una película de ciencia ficción que muestra una explosión distante en el espacio exterior y tú ves y escuchas la explosión al mismo tiempo?
70. ¿Por qué quienes marchan al final de un largo desfile detrás de una banda estarán fuera de ritmo con quienes marchan cerca del frente?
71. ¿Por qué romper el paso al marchar sobre un puente es un procedimiento prudente para los soldados?
72. ¿Por qué el sonido de un arpa es suave en comparación con el sonido de un piano?
73. Tu compañero de clase dice que la rapidez del sonido y la frecuencia del sonido dependen del medio en el que viaja. ¿Con qué parte de este enunciado no estás de acuerdo?
74. Quienes viven en departamentos darán testimonio de que las notas bajas se escuchan de manera más clara en la música que tocan los departamentos vecinos. ¿Por qué supones que los sonidos con frecuencia más baja viajan con más facilidad a través de paredes, pisos y techos que los sonidos con frecuencia alta?
75. La cítara, un instrumento musical de India, tiene un conjunto de cuerdas que vibran y producen música, aun cuando nunca las pulse el músico. Estas "cuerdas simpáticas" son idénticas a las cuerdas pulsadas y se montan bajo ellas. ¿Cuál es tu explicación?
76. ¿Por qué una pista de baile se mueve sólo cuando se realizan ciertos tipos de pasos de baile?
77. Un dispositivo especial puede transmitir sonido fuera de fase desde un martillo neumático ruidoso a su operador que usa audífonos. Sobre el ruido del martillo neumático, el operador puede escuchar con facilidad tu voz aunque tú no puedes escuchar la suya. Explica.
78. Un objeto resuena cuando la frecuencia de una fuerza de vibración coincide con su frecuencia natural o es un submúltiplo de su frecuencia natural. ¿Por qué no resonará a múltiplos de su frecuencia natural? (*Sugerencia:* piensa en cuando empujas a un niño en un columpio.)
79. ¿Cómo es que cierta nota cantada por un cantante puede romper una copa de cristal?
80. ¿Los batimientos son el resultado de la interferencia, del efecto Doppler, o de ambos?
81. ¿Es correcto decir que los batimientos del sonido son muy parecidos al rítmico "compás"* de la música? Defiende tu respuesta.
82. Dos ondas sonoras de la misma frecuencia pueden interferir pero, con la finalidad de producir batimientos, las dos ondas sonoras deben tener frecuencias diferentes. ¿Por qué?
83. Supón que un afinador de piano escucha 3 batimientos por segundo cuando escucha el sonido combinado de un diapasón y la cuerda del piano que afina. Después de apretar un poco la cuerda, escucha 5 batimientos por segundo. ¿Debe aflojar o apretar la cuerda?
84. Un afinador de pianos usa un diapasón de 264 Hz y escucha 4 batimientos por segundo. ¿Cuáles son las dos posibles frecuencias de vibración de la cuerda del piano?
85. Un ser humano no puede escuchar sonido a una frecuencia de 100 kHz o sonido a 102 kHz. Pero si camina hacia una habitación en la que dos fuentes emiten ondas sonoras, una a 100 kHz y la otra a 102 kHz, escuchará un sonido. Explica.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

86. A medida que viertes agua en un vaso, golpea en forma repetida el vaso con una cuchara. Conforme se llena el vaso que golpeas, ¿la altura del sonido aumenta o disminuye? (Discute qué harías para responder esta pregunta.)
87. Analiza por qué el sonido viaja más rápido en aire húmedo. (Observa que, a la misma temperatura, las moléculas de vapor de agua tienen la misma energía cinética promedio que las moléculas más pesadas de nitrógeno y oxígeno en el aire.) ¿Cómo, entonces, se comparan las rapideces promedio de las moléculas de $H_2O$ con las rapideces de las moléculas de $N_2$ y $O_2$?
88. Las ondas ultrasónicas tienen muchas aplicaciones en la tecnología y en la medicina. Una ventaja es que pueden usarse grandes intensidades sin peligro para el oído. Cita otra ventaja de su longitud de onda corta. (*Sugerencia:* ¿Por qué los microscopistas utilizan luz azul en lugar de luz blanca para ver detalles?)
89. Una regla empírica para calcular la distancia en kilómetros entre un observador y un relámpago es dividir entre 3 el número de segundos en el intervalo entre el destello y el sonido. ¿Esta regla es correcta? Discute la razón por la que es correcta o incorrecta.
90. Un par de bocinas a ambos lados de un escenario emiten tonos puros idénticos (tonos de frecuencia fija y longitud de onda fija en el aire). Cuando estás de pie en el pasillo central, a la misma distancia de las dos bocinas, escuchas el sonido fuerte y claro. ¿Por qué la intensidad del sonido disminuye mucho cuando te vas hacia un lado? (*Sugerencia:* usa un diagrama que demuestre tu argumento.)
91. Cuando dos bocinas fuera de fase se acercan como se muestra en la Figura 20.19, ¿cuáles ondas se cancelan más: las ondas largas o las ondas cortas? Defiende y discute tu respuesta.

*El autor juega con la palabra *beat*: *beats*, batimientos; *beat*, ritmo, compás.

# 21

CAPÍTULO 21

# Sonidos musicales


21.1 Ruido y música

21.2 Altura

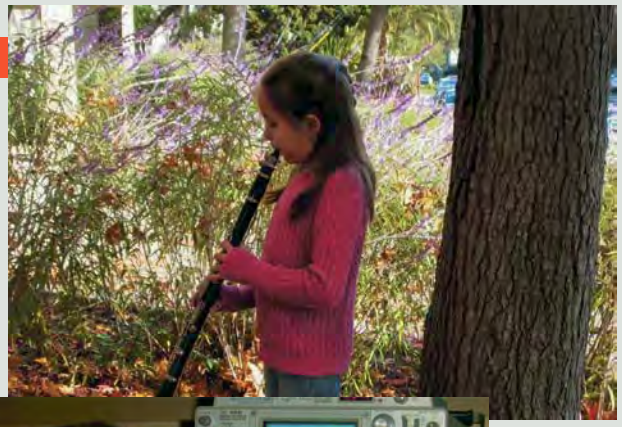
21.3 Intensidad del sonido y sonoridad

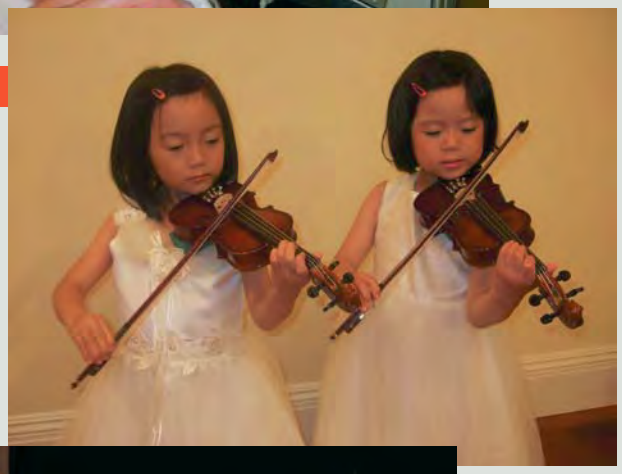
21.4 Calidad

21.5 Instrumentos musicales

21.6 Análisis de Fourier

21.7 De analógico a digital



**1** Gracie Hewitt produce tonos apacibles con su clarinete. **2** Norm Whitlatch muestra los primeros cinco armónicos, en el osciloscopio inferior, a partir de un análisis de Fourier del sonido del diapasón de una guitarra, que se muestra en la traza verde del osciloscopio superior. **3** Michelle Anna Wong y Miriam Dijamco deleitan al público cuando deslizan los arcos por las cuerdas de sus violines. **4** La cantante y física, Lynda Williams, instructora de física en Santa Rosa Junior College, deleita a las audiencias con sus canciones sobre física.

¿Qué tiene que ver la física con la música? ¡MUCHO! Desde tiempos antiguos, los científicos han visto una relación muy cercana entre la música y las matemáticas. Uno de estos matemáticos y físicos fue Jean Baptiste Joseph Fourier, quien nació en Francia en 1768. Fue

hijo de un sastre y quedó huérfano a los 10 años de edad. Fourier mostró signos de gran brillantez, pero al no ser de "buena cuna", fue inelegible para una comisión que buscó en los cuerpos científicos del ejército. En vez de ello, aceptó un puesto de profesor militar y se convirtió en maestro de matemáticas.

En su distrito natal, Fourier tuvo una participación destacada en la promoción de la Revolución Francesa. A los 30 años de edad participó con Napoleón Bonaparte en su expedición egipcia y fue nombrado gobernador del bajo Egipto. Aislado de Francia por la flota inglesa, Fourier organizó los talleres donde el ejército francés se apoyó para proveerse sus municiones de guerra. En aquella época también contribuyó con varios ensayos matemáticos al instituto que fundó Napoleón, el Instituto del Cairo. Después de las victorias inglesas, Fourier regresó a Francia, donde realizó experimentos sobre la propagación del calor. Descubrió que la suma de las funciones trigonométricas simplificaba enormemente el estudio de la propagación del calor.

Fourier descubrió una regularidad matemática en las partes que componen cualquier tipo de movimiento ondulatorio periódico. Descubrió que incluso las ondas periódicas más complejas pueden descomponerse en simples ondas sinusoidales que se suman. Lo que descubrió en 1822 se llama en la actualidad análisis de Fourier. En este capítulo verás cómo se aplica esto a los sonidos musicales.

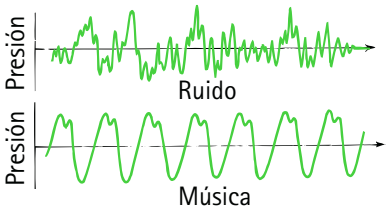



**FIGURA 21.1**
Representaciones gráficas del ruido y la música.

## 21.1 Ruido y música

Casi todos los sonidos que escuchas son ruidos. El impacto de un objeto que cae, el golpe de una puerta, el rugido de una motocicleta y la mayoría de los sonidos del tráfico en las calles de la ciudad son ruidos. El ruido corresponde a una vibración irregular del tímpano producida por alguna vibración irregular en tu entorno, un revoltijo de longitudes de onda y amplitudes. El *ruido blanco* es una mezcla de varias frecuencias de sonido, tal como la luz blanca es una mezcla de todas las frecuencias de luz. El sonido de la marea, de las hojas que crujen o del agua que burbujea en un arroyo se describe como ruido blanco.

La música es el arte del sonido y tiene un carácter diferente. Los sonidos musicales tienen tonos periódicos, o *notas* musicales. Aunque el ruido no tiene estas características, la línea que separa la música del ruido puede ser delgada y subjetiva. Para algunos compositores contemporáneos, no existe. Algunas personas consideran a la música contemporánea y a la música de otras culturas como ruido. Diferenciar estos tipos de música del ruido se vuelve un problema de estética. Sin embargo, distinguir la música tradicional (esto es, la música clásica occidental y la mayoría de los tipos de música popular) del ruido no plantea ningún problema. Una persona con pérdida auditiva total podría distinguir entre éstas con un osciloscopio, como lo muestra Norm Whitlatch en la segunda de las fotografías al inicio del capítulo. Cuando una señal eléctrica proveniente de un micrófono se alimenta a un osciloscopio, los patrones de variaciones en la presión del aire con el tiempo se despliegan bastante bien, lo que permite distinguir entre el ruido y la música tradicional (Figura 21.1).

Los músicos por lo general hablan de tonos musicales en términos de tres características principales: altura o tono, sonoridad y calidad.

**PUNTO DE CONTROL**

**Un golpe seco hace ruido. ¿Una serie de golpes secos puede ser musical?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Sí, especialmente cuando se repiten con regularidad... piensa en un solo de tambor.

## 21.2 Altura

La música está organizada en muchos niveles diferentes. Los más notables son las notas musicales. Tú las recuerdas desde tus primeros años de escuela como "do, re, mi, fa, sol, la, si y do". Cada nota tiene su propia **altura**. La altura puede describirse por la frecuencia. Las vibraciones rápidas de la fuente sonora (frecuencia alta) producen un sonido con una gran altura, es decir, un sonido agudo; en tanto que las vibraciones lentas (frecuencia baja) producen una altura baja, es decir, un sonido grave. A menudo se habla de la altura de un sonido en términos de su posición en la escala musical. En Estados Unidos y otros países, los músicos asignan a las diferentes alturas letras distintas: A, B, C, D, E, F, G.* Cuando la (A), llamada también nota "la 440", se toca en un piano, un martillo golpea dos o tres cuerdas, cada una de las cuales vibra 440 veces en 1 segundo. La altura de la 440 corresponde a 440 hertz.[1] Las notas de la (A) a sol (G) son todas notas dentro de una octava. Multiplica la frecuencia de cualquier nota por 2 y tendrás la misma nota a una altura mayor en la siguiente octava. Un teclado de piano cubre un poco más de siete octavas (Figura 21.2).

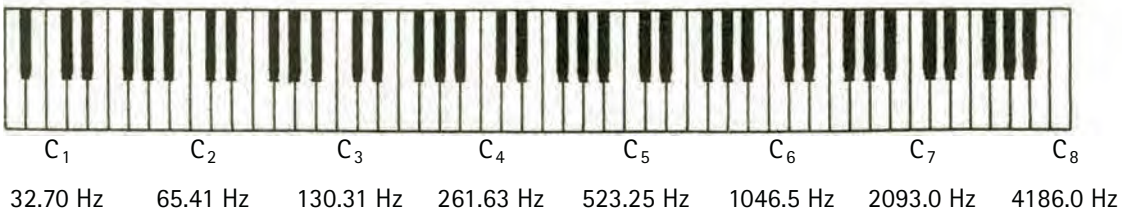



**FIGURA 21.2**
Teclado de piano. El do bajo ($C_1$) es de 32.70 Hz y los sobretonos sucesivos de do se duplican en frecuencia. El do de 261.63 Hz se llama do medio.

Para obtener las diferentes notas musicales se cambia la frecuencia de la fuente de sonido en vibración. Por lo general, esto se hace al alterar el tamaño, la tensión o la masa del objeto en vibración. Un guitarrista o violinista, por ejemplo, ajusta la tensión de las cuerdas cuando las afina. Entonces puede reproducir diferentes notas cuando altera la longitud de cada cuerda al "detenerla" con los dedos. En los instrumentos de aliento, puede alterarse la longitud de la columna de aire en vibración (trombón y trompeta) o pueden abrirse y cerrarse los orificios a los lados del tubo en varias combinaciones (saxofón, clarinete y flauta) para cambiar la altura de la nota producida.

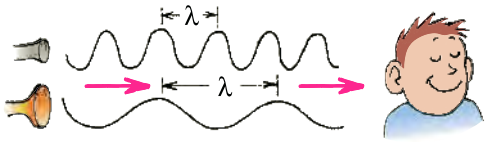



**FIGURA 21.3**
Ambas ondas sonoras viajan con la misma rapidez. La que tiene la longitud de onda más corta λ llega al oído del escucha con más frecuencia. Por tanto, tiene una frecuencia más alta y se escucha como una altura mayor.

Los sonidos agudos que se usan en música casi siempre son menores a 4,000 Hz, pero algunas personas jóvenes pueden escuchar sonidos con frecuencias de hasta 20,000 Hz. Algunas personas y la mayoría de los perros pueden escuchar tonos con alturas superiores a esto. En general, el límite superior de audición de la gente disminuye con la edad. Un sonido muy agudo a menudo es inaudible para un adulto mayor y, sin embargo, puede ser escuchado con claridad por alguien más joven. Esto se debe al envejecimiento de los capilares sensibles en el órgano de Corti del oído. La audición, en especial de las frecuencias más altas, disminuye con la edad.

**PUNTO DE CONTROL**

**El sonido emitido por los murciélagos es en extremo intenso. ¿Por qué el ser humano no puede escucharlo?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La frecuencia del sonido emitido por los murciélagos es más alta de lo que pueden escuchar los seres humanos. De otro modo, ¡el sonido de los murciélagos volvería loca a la gente!

[1]Es interesante que el la 440 por lo general se defina como 440 Hz. Pero algunas personas lo definen con una frecuencia de apenas 436 Hz o de hasta 448 Hz.
*N.T. Que corresponden, respectivamente, a: la, si, do, re, mi, fa, sol.

## 21.3 Intensidad del sonido y sonoridad

La **intensidad** del sonido depende de la amplitud de las variaciones de presión en el interior de la onda sonora. (Y, como con todas las ondas, la intensidad es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud de onda.) La intensidad se mide en unidades de watts/metro cuadrado. El oído humano responde a intensidades que cubren el enorme intervalo de $10^{-12}$ W/m$^2$ (el umbral de audición) a más de 1 W/m$^2$ (el umbral de dolor). Debido a que el intervalo es tan grande, las intensidades se escalan en factores de 10, con el apenas audible $10^{-12}$ W/m$^2$ como la intensidad de referencia, llamada 0 *bel* (una unidad en honor a Alexander Graham Bell). Un sonido 10 veces más intenso tiene una intensidad de 1 bel ($10^{-11}$ W/m$^2$) o 10 *decibeles*. La Tabla 21.1 menciona algunos sonidos y sus intensidades. Un sonido de 10 decibeles es 10 veces más intenso que 0 decibeles, el umbral de audición. Por consiguiente, 20 decibeles es 100, o $10^2$, veces la intensidad del umbral de audición, 30 decibeles es $10^3$ veces el umbral de audición y 40 decibeles es $10^4$ veces. De modo que 60 decibeles representa una intensidad sonora un millón de veces ($10^6$) mayor que 0 decibeles. ¿Puedes ver que 80 decibeles representa un sonido $10^2$ veces más intenso que 60 decibeles?[2]

Los tapones de oídos por lo general reducen el ruido en aproximadamente 30 dB.

**pti**

- La ballena azul emite los sonidos más intensos, mayores que 180 dB en el agua, pero con una altura demasiado baja como para que el ser humano los detecte sin equipo sensible.

**TABLA 21.1 FUENTES E INTENSIDADES SONORAS COMUNES**

| Fuente de sonido | Intensidad (W/m$^2$) | Nivel sonoro (dB) |
|---|---|---|
| Avión jet a 30 m de distancia | $10^2$ | 140 |
| Sirena de ataque aéreo, cercana | 1 | 120 |
| Música disco, amplificada | $10^{-1}$ | 110 |
| Remachadora | $10^{-3}$ | 90 |
| Calle muy transitada | $10^{-5}$ | 70 |
| Conversación en casa | $10^{-6}$ | 60 |
| Radio a bajo volumen en casa | $10^{-8}$ | 40 |
| Murmullo | $10^{-10}$ | 20 |
| Crujido de las hojas de un árbol | $10^{-11}$ | 10 |
| Umbral de audición | $10^{-12}$ | 0 |

**FIGURA 21.4**
James despliega una señal sonora en un osciloscopio.

El daño fisiológico a la audición comienza con la exposición a 85 decibeles, y el grado de daño depende de la duración de la exposición y de las características de la frecuencia. El daño de los sonidos intensos puede ser temporal o permanente, dependiendo de si el nervio que termina en el órgano de Corti, el órgano receptor del oído interno, se deteriora o se destruye. Un solo estallido de sonido puede producir vibraciones en el órgano tan intensas que lo rompan. El ruido menos intenso, pero severo, puede interferir en los procesos celulares del órgano y causar su posible rompimiento. Por desgracia, las células del órgano no se regeneran.

La intensidad sonora es un atributo meramente objetivo y físico de una onda sonora y puede medirse con varios instrumentos acústicos (y el osciloscopio de la Figura 21.4). La **sonoridad**, por otra parte, es una sensación fisiológica. El oído percibe algunas frecuencias mucho mejor que otras. Un sonido de 3,500 Hz a 80 decibeles, por ejemplo, suena cerca de dos veces más sonoro para la mayoría de las personas que un sonido de 125 Hz a 80 decibeles; el ser humano es más sensible al intervalo de frecuencias de 3,500 Hz. Los sonidos más intensos que pueden tolerar los seres humanos tienen intensidades un billón de veces más grandes que los sonidos más débiles. Sin embargo, la diferencia en sonoridad percibida es mucho menor que esta cantidad.

[2]La escala decibel es una escala logarítmica. La clasificación de los decibeles es proporcional al logaritmo de la intensidad.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿La audición se deteriora de manera permanente en los conciertos, clubes o funciones que reproducen música muy intensa?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Sí, dependiendo de cuán intensa, durante cuánto tiempo, cuán cerca y qué tan a menudo. Algunos grupos musicales destacan la sonoridad por encima de la calidad. Por desgracia, a medida que la audición se va deteriorando, los integrantes del grupo (y sus fanáticos) necesitan sonidos cada vez más intensos para animarse. La pérdida auditiva causada por sonidos es particularmente común en el intervalo de frecuencia de 2,000-5,000 Hz. Recuerda que la audición humana suele ser más sensible alrededor de 3,000 Hz. (¿Buscas una profesión? Considera volverte audiólogo, ¡tendrás mucho trabajo!)

## 21.4 Calidad

Uno no tiene problemas para distinguir entre el tono de un piano y un tono de la misma altura de un clarinete. Cada uno de esos tonos tiene un sonido característico que difiere en **calidad**, el "color" de un tono: el *timbre*. El timbre describe todos los aspectos de un sonido musical distintos a la altura, la sonoridad y la longitud de tono. El timbre se describe subjetivamente como pesado, ligero, turbio, atenuado, suave o transparentemente claro. El sonido de una viola, por ejemplo, tiene un sonido notablemente "más profundo", mientras que el violín tiene un sonido notablemente "más brillante".

La mayoría de los sonidos musicales son una superposición de muchos tonos que difieren en frecuencia. Los diferentes tonos se llaman **tonos parciales**, o simplemente *parciales*. La frecuencia más baja, llamada **frecuencia fundamental**, determina la altura de la nota. Un tono parcial cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental se llama **armónico**. Diferentes armónicos tienen diferentes alturas. Un tono que tiene el doble de frecuencia de la fundamental es el segundo armónico; un tono con tres veces la frecuencia fundamental es el tercer armónico; y así sucesivamente (Figura 21.5).[3] Es la variedad de tonos parciales lo que da a una nota musical su calidad característica. Así puedes ver que los instrumentos musicales tienen timbres característicos, cada uno con su propio "color".

Por ende, si golpeas el do medio en el piano, produces un tono fundamental con una altura de aproximadamente 262 Hz y también una mezcla de tonos parciales de dos, tres, cuatro, cinco, etc., veces la frecuencia del do medio. El número y sonoridad relativa de los tonos parciales determina la calidad del sonido asociada al piano. El sonido de prácticamente todo instrumento musical consiste en una fundamental y sus parciales. Los tonos puros, aquellos que tienen sólo una frecuencia, pueden producirse electrónicamente. Algunos sintetizadores electrónicos producen tonos puros, y mezclas de estos tonos, para brindar una gran variedad de sonidos musicales.

La calidad de un tono está determinada por la presencia e intensidades relativas de los diferentes parciales. Los sonidos producidos por cierto tono del piano y un tono

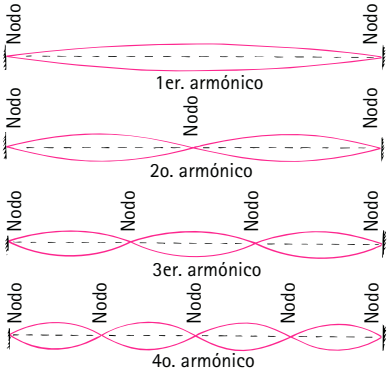



**FIGURA 21.5**
Modos de vibración de una cuerda de guitarra.

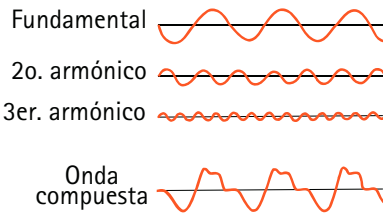



**FIGURA 21.6**
La frecuencia fundamental y sus armónicos se combinan para producir una onda compuesta.

[3]En la terminología que se usa con frecuencia en música, el segundo armónico se llama *primer sobretono*, el tercer armónico se llama *segundo sobretono* y así sucesivamente. No todos los tonos parciales en un tono complejo son múltiplos enteros de la fundamental. A diferencia de los armónicos de los instrumentos de aliento de madera y los metales, los instrumentos de cuerda, como los pianos, producen tonos parciales "estirados" que son casi, aunque no del todo, armónicos. Éste es un factor importante en la afinación de pianos, y ocurre porque la rigidez de las cuerdas agrega un poco de fuerza restauradora a la tensión.

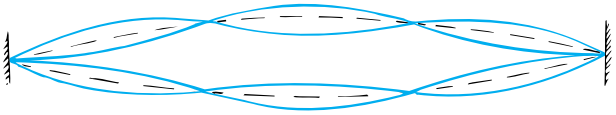


**FIGURA 21.7**
Vibración compuesta del modo fundamental y el tercer armónico.

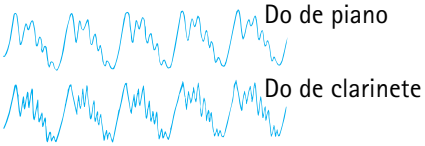



**FIGURA 21.8**
Los sonidos del piano y el clarinete difieren en calidad.

de clarinete de la misma altura tienen diferentes cualidades que el oído puede reconocer porque sus parciales son distintos. Tonos de la misma altura con distintas cualidades tienen o diferentes parciales o una diferencia en las intensidades relativas de los parciales.

**PUNTO DE CONTROL**

**La altura y la sonoridad de las voces de dos personas pueden ser iguales, pero las distingues con facilidad. ¿Por qué?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La voz de cada persona tiene una mezcla característica de tonos parciales. Se dice que la voz de cada quien tiene su propio timbre, su propio "color" especial.

## 21.5 Instrumentos musicales

Los instrumentos musicales convencionales pueden agruparse en tres clases: aquellos en los cuales el sonido se produce mediante cuerdas en vibración, aquellos en los que el sonido se produce mediante la vibración de columnas de aire, y aquellos donde el sonido se produce mediante *percusión*, como con la vibración de una superficie bidimensional.

En un instrumento de cuerdas, la vibración de las cuerdas se transfiere a una caja de resonancia y luego al aire, pero con baja eficiencia. Para compensar esto, las orquestas tienen secciones de cuerdas relativamente grandes. Un menor número de los instrumentos de aliento de alta eficiencia compensan suficientemente un número mucho mayor de violines.

En un instrumento de aliento, el sonido es una vibración de una columna de aire en el instrumento. Hay varias formas de poner a vibrar columnas de aire. En los instrumentos de metal, como las trompetas, cornos franceses y trombones, el aire se sopla en la boquilla del instrumento en o cerca de un extremo del tubo y sale en el otro extremo. Las vibraciones de los labios del intérprete interactúan con las ondas estacionarias que se establecen por la energía acústica reflejada en el interior del instrumento por el extremo acampanado del instrumento. El sonido proveniente de los instrumentos de aliento depende sobre todo del tamaño y la forma del tubo por donde el aire se mueve. Para manipular la longitud de la columna de aire en vibración, se empujan válvulas que agregan o restan segmentos adicionales[4] o se extiende la longitud del tubo, como en un trombón. En los instrumentos de madera, como clarinetes, oboes y saxofones, un chorro de aire producido por el músico pone a vibrar una lengüeta, mientras que en pífanos, flautas y flautines, el músico sopla aire contra el borde de un orificio para producir un chorro en vibración que pone a vibrar la columna de aire.

**FIGURA 21.9**
Cada vez que Bay Johnson golpea una tecla del piano, golpea una cuerda en el piano. Las cuerdas de piano para notas bajas son más pesadas, tienen más inercia y vibran a una frecuencia más baja, una altura más baja que las cuerdas más ligeras con la misma tensión de cuerda. La sonoridad tiene que ver con cuán duro se golpean las teclas, lo que afecta las amplitudes de las cuerdas en vibración. La sensibilidad táctil del piano lo distingue de los primeros instrumentos con teclado, como el clavecín.

[4]Un clarín no tiene ni válvulas ni longitud variable. Un músico que toca este instrumento debe ser experto en la creación de varios sobretonos para obtener diferentes notas.

En los instrumentos de percusión, como tambores y címbalos, una membrana bidimensional o superficie elástica se golpea para producir sonido. El tono fundamental producido depende de la geometría, la elasticidad y, en algunos casos, la tensión de la superficie. Los cambios de altura resultan de cambiar la tensión de la superficie en vibración; sumir con la mano el borde de la membrana de un tambor es una forma de lograr esto. Pueden establecerse varios modos de vibración si se golpea la superficie en diferentes lugares. En los timbales, por ejemplo, la forma de la caldera cambia la frecuencia del tambor. Como en todos los sonidos musicales, la calidad depende del número y la sonoridad relativa de los tonos parciales.

Los instrumentos musicales electrónicos difieren mucho de los instrumentos musicales convencionales. En lugar de cuerdas que deban tocarse con un arco, pulsarse o golpearse, o lengüetas sobre las cuales deba soplarse aire, o diafragmas que deban golpearse para producir sonidos, algunos instrumentos musicales usan electrones para generar las señales que producen los sonidos musicales. Otros inician con un sonido proveniente de un instrumento acústico y luego lo modifican. La música electrónica demanda del compositor y el intérprete una experiencia que rebasa el conocimiento de musicología. Esto pone una nueva y poderosa herramienta en manos del músico.

**PUNTO DE CONTROL**

**El sonido de una guitarra proviene de cuerdas en vibración. ¿Qué es lo que vibra para producir el sonido en un clarín? ¿En un clarinete?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

En los instrumentos de aliento metálicos, como los clarines, las trompetas y los trombones, los labios del intérprete vibran uno contra otro y contra el borde de la boquilla. En los instrumentos de aliento de madera, como clarinetes, saxofones y oboes, el sonido se produce mediante lengüetas en vibración.

## 21.6 Análisis de Fourier

¿Alguna vez observaste de cerca los surcos de un antiguo disco de fonógrafo, del tipo en el que la abuela y el abuelo escuchaban música? Las variaciones en el ancho de los surcos, que se ven en la Figura 21.11, hacen que la aguja del fonógrafo vibre conforme viaja en el surco en movimiento. Dichas vibraciones mecánicas, a su vez, se transforman en vibraciones eléctricas que producen sonido. ¿No es notable que todas las distintas vibraciones producidas por los diversos instrumentos de una orquesta se capturen y luego se conviertan en una sola señal sonora?

**FIGURA 21.10**
Los discos fonográficos no han desaparecido del todo, ya que los *disc jockeys* producen mezclas dinámicas de sonido.

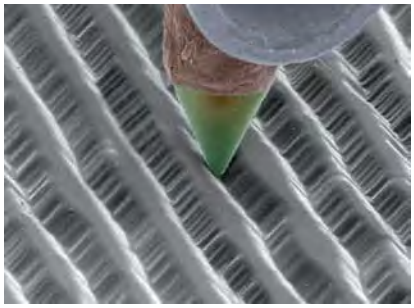


**FIGURA 21.11**
Vista microscópica de los surcos en un disco fonográfico.

Los pericos, como los seres humanos, usan sus lenguas para crear y formar sonidos. Pequeños cambios en la posición de la lengua del perico propician diferencias grandes en el sonido que se produce primero en la siringe del perico, un órgano vocal anidado entre la tráquea y los pulmones.

El sonido de un oboe desplegado en la pantalla de un osciloscopio se parece a la Figura 21.12a. Esta onda corresponde a las vibraciones en el oboe. También corresponde a la señal amplificada que activa la bocina del sistema de sonido y a la amplitud del aire que vibra contra el tímpano. La Figura 21.12b muestra el aspecto de la onda de un clarinete. Cuando el oboe y el clarinete suenan en conjunto, el principio de superposición es evidente pues cada una de sus ondas se combinan para producir la onda que se muestra en la Figura 21.12c.

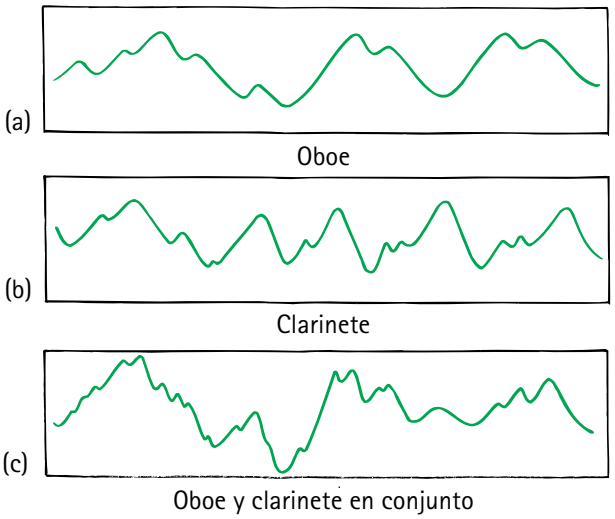



**FIGURA 21.12**
Formas de onda de (a) un oboe, (b) un clarinete y (c) el oboe y el clarinete que suenan en conjunto.

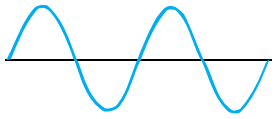


**FIGURA 21.13**
Una onda sinusoidal.

La forma de la onda de la Figura 21.12c es el resultado neto de las formas a y b superpuestas (en interferencia). Si conoces a y b, es sencillo crear c. Pero un problema muy distinto es discernir en c las formas de a y b que la constituyen. Al observar sólo la forma c, no es posible descifrar el oboe del clarinete. Pero si escuchas una grabación de la música, tus oídos distinguirán a la vez qué instrumentos se tocan, cuáles notas tocan y cuál es su sonoridad relativa. Tus oídos descomponen en forma automática la señal total en sus partes componentes.

Como se mencionó al comienzo de este capítulo, el matemático francés Jean Baptiste Joseph Fourier descubrió una regularidad matemática en las partes componentes del movimiento ondulatorio periódico. Descubrió que incluso el movimiento ondulatorio periódico más complejo puede desensamblarse en ondas sinusoidales simples que se suman. Recuerda que una onda sinusoidal es la más simple de las ondas, que tiene una sola frecuencia (Figura 21.13). Fourier descubrió que todas las ondas periódicas pueden descomponerse en ondas sinusoidales constituyentes de diferentes amplitudes y frecuencias. La operación matemática para realizar esto se llama **análisis de Fourier**. Aquí no se explicarán las matemáticas, sino sólo se apuntará que, con tal análisis, uno puede encontrar las ondas sinusoidales puras que se suman para componer el tono de, por decir, un violín. Cuando dichos tonos puros suenan juntos, como cuando se golpean algunos diapasones o se seleccionan las teclas adecuadas en un órgano eléctrico, se combinan para dar el tono del violín. La onda sinusoidal con frecuencia más baja es la fundamental y determina la altura de la nota. Las ondas sinusoidales con frecuencia más alta son los tonos parciales que brindan la calidad característica. Por ende, la onda de cualquier sonido musical no es más que una suma de ondas sinusoidales simples.

Puesto que la onda de la música es una multitud de varias ondas sinusoidales, para duplicar con exactitud el sonido por cualquiera de los medios con los que se graba el sonido, debes procesar un intervalo de frecuencias lo más grande posible. Las notas del teclado de un piano varían de 27 Hz a 4,200 Hz, pero, para duplicar con exactitud la música de una composición de piano, el sistema de sonido debe tener un intervalo

de frecuencias de hasta 20,000 Hz. Cuanto mayor sea el intervalo de las frecuencias de un sistema de sonido eléctrico, más se aproximará la salida musical al sonido original, de ahí el amplio intervalo de frecuencias en los mejores sistemas de sonido.

Tu oído realiza una especie de análisis de Fourier en forma automática. Ordena la compleja confusión de pulsaciones de aire que llegan a él y las transforma en tonos puros compuestos de ondas sinusoidales. Cuando escuchas, recombinas varios agrupamientos de dichos tonos puros. Lo que escuchas cuando acudes a un concierto depende de las combinaciones de tonos en las que aprendiste a centrar tu atención. Puedes dirigir tu atención a los sonidos de los diversos instrumentos y discernir los tonos más débiles de los más fuertes; puedes deleitarte con la intrincada interacción de los instrumentos y aun así detectar los extraños ruidos de los demás a tu alrededor. Ésta es una proeza increíble.

**FIGURA 21.14**
¿Cada persona escucha la misma música?

## 21.7 De analógico a digital

¿Quién aprecia mejor la música: un conocedor o un escucha casual?

Cuando escuchas a alguien decir cuán emocionante debió de ser vivir en una época donde se pasó de la luz de gas a la electricidad, o del caballo y la carreta a los automóviles, puedes decirle que también vives en una época muy emocionante; quizás aún más emocionante. Vives en una era digital, cuando los cambios son del almacenamiento y la transmisión de información analógica a lo digital. Aquellos cartuchos de 8 pistas, casetes, VHS y discos analógicos, rápidamente se están volviendo obsoletos.

Los reproductores fonográficos de antaño utilizaban una aguja convencional que vibraba en los surcos garabateados de un disco de más del doble de diámetro de los CD y los DVD de hoy en día. La salida de una grabación fonográfica era una señal del tipo que se muestra en la Figura 21.12. Este tipo de onda continua se llama señal *analógica*. La señal analógica puede convertirse en una señal *digital* si se mide el valor numérico de su amplitud muchas veces por segundo (Figura 21.15). Este valor numérico se expresa en el sistema numérico que es conveniente para las computadoras, llamado *binario*. En el código binario, cualquier número puede expresarse como una sucesión de 1 y 0; por ejemplo, el número 1 es 1, 2 es 10, 3 es 11, 4 es 100, 5 es 101, 17 es 10001 y así sucesivamente. De modo que la forma de la onda analógica se expresa como una serie de pulsos de "encendido" y "apagado" que corresponde a una serie de 1 y 0 en código binario.

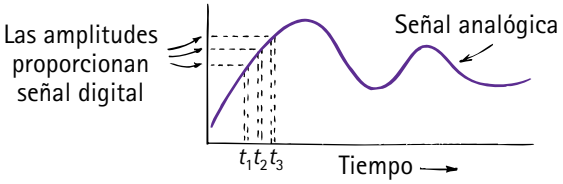



**FIGURA 21.15**
La amplitud de la onda analógica se mide en fracciones de segundo sucesivas para proporcionar información digital que se registra en forma binaria sobre la superficie reflejante del CD.

Depresiones microscópicas (pits), de aproximadamente un treceavo del diámetro de un cabello humano, se incrustan en el CD o DVD (Figura 21.16). Los pits son de dos tipos, cortos y largos, donde los cortos corresponden al 0 y los largos al 1. Un haz láser lee dichos pits. Cuando el haz cae en un pit corto sobre la superficie, se refleja hacia el

**FIGURA 21.16**
Vista microscópica de los pits (depresiones) de un disco láser.

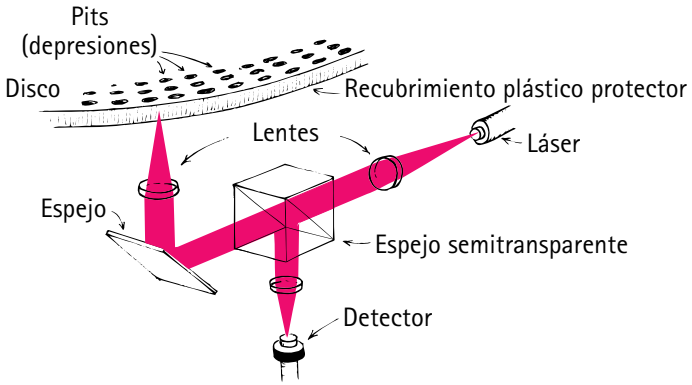



**FIGURA 21.17**
Un haz láser enfocado en forma correcta lee información digital representada por una serie de pits sobre el disco láser.

sistema óptico del reproductor y registra un 0. Cuando el haz incide sobre un pit más largo que pasa, el sensor óptico registra un 1. En consecuencia, el haz lee los dígitos 1 y 0 del código binario.

En un CD, la tasa a la que dichos pequeños pits se muestrean es 44,100 veces por segundo. Si pudieras juntar 44,100 pits sin traslaparlos, serían del tamaño del punto al final de esta oración. Miles de millones de bits de información se codifican en la superficie reflectora, que está cubierta con una capa protectora de laca transparente.

Un DVD de una sola capa tiene aproximadamente seis veces la capacidad de transporte de información o de almacenamiento de información de un CD: 4.37 miles de millones de bytes (GB) frente a 700 millones de bytes (MB). (Cada byte corresponde a ocho bits.) Un DVD tiene pits más pequeños y una pista espiral más del doble de larga que la de un CD. Los pits más pequeños del DVD se leen con una luz láser con longitud de onda más corta y también mediante un lente de enfoque más poderoso. Mientras que los pits de un CD se encuentran en una sola superficie reflectora, algunos DVD tienen múltiples capas, y almacenan incluso más información en un disco. Con el enfoque preciso, la luz láser lee los pits de la capa deseada.

Ahora existe el reproductor DVD Blu-ray™ de 25 GB. Usa luz azul con una longitud de onda más corta para leer más pits almacenados en un disco. Más información significa mayor resolución, de modo que la mayor capacidad de almacenamiento es la que permite las imágenes increíblemente claras que ofrecen los DVD Blu-ray™ de alta definición.

Pronto incluso los DVD y los discos Blu-ray™ se unirán a los discos fonográficos y las cintas VHS como objetos de museo, a medida que la información en el nuevo mundo digital se disperse mediante el gigabyte y el terabyte a través de Internet y las ondas de radio.

El almacenamiento de datos cambia en forma continua, de los discos de vinil y las cintas analógicas de ayer, a los CD, DVD, Blu-ray, memorias *flash* y tarjetas SD digitales, a la "nube". Espera a que éstos también se vuelvan objetos de museo a medida que ocupen su lugar nuevas formas.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Altura.** Qué tan agudo o qué tan grave es un tono, como en una escala musical, que principalmente está regida por la frecuencia. Una fuente que vibra a una frecuencia alta produce un sonido de gran altura; una fuente que vibra a una frecuencia baja produce un sonido de poca altura.

**Intensidad.** La potencia por metro cuadrado transportada por una onda sonora; suele medirse en decibeles.

**Sonoridad.** La sensación fisiológica directamente relacionada con la intensidad sonora o el volumen.

**Calidad.** Sonido característico de un instrumento musical o voz, que se rige por el número y las intensidades relativas de los tonos parciales.

**Tono parcial.** Onda sonora de una sola frecuencia que forma parte de un tono complejo. Cuando la frecuencia de un tono parcial es un múltiplo entero de la frecuencia más baja, se le conoce como *armónico*.

**Frecuencia fundamental.** La frecuencia de vibración más baja, o primer armónico, en un tono musical.

**Armónico.** Tono parcial cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. El segundo armónico tiene el doble de frecuencia de la fundamental, el tercer armónico tiene tres veces la frecuencia, y así en secuencia.

**Análisis de Fourier.** Método matemático que descompone cualquier onda periódica en una combinación de ondas sinusoidales simples.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 21.1 Ruido y música

1. Distingue entre ruido y música.
2. ¿Cuáles son las tres características principales de los tonos musicales?

### 21.2 Altura

3. ¿Cómo se relaciona con la frecuencia una nota musical alta?
4. ¿Cómo varía con la edad la altura más grande que uno puede escuchar?

### 21.3 Intensidad del sonido y sonoridad

5. ¿Qué mide un decibel?
6. ¿Cuántos decibeles corresponden al sonido con intensidad más baja que puedes escuchar?
7. ¿El sonido de 30 dB es 30 veces mayor que el umbral de audición o $10^3$ (mil) veces mayor?
8. Entre la intensidad sonora y la sonoridad, ¿cuál es más subjetiva?
9. ¿Cómo se comparan los sonidos más sonoros que uno puede tolerar con los sonidos más débiles?

### 21.4 Calidad

10. ¿Qué se entiende por frecuencia fundamental de una nota musical?
11. Si la frecuencia fundamental de una nota es 200 Hz, ¿cuál es la frecuencia del segundo armónico?
12. Si la frecuencia fundamental de una nota es 200 Hz, ¿cuál es la frecuencia del tercer armónico?
13. ¿Qué determina la calidad musical de una nota?
14. ¿Por qué las mismas notas pulsadas en un banjo y en una guitarra tienen sonidos claramente diferentes?

### 21.5 Instrumentos musicales

15. ¿Cuáles son las tres principales clases de instrumentos musicales?
16. ¿Por qué, por lo general, las orquestas tienen un mayor número de instrumentos de cuerda que de aliento?

### 21.6 Análisis de Fourier

17. ¿Qué descubrió Fourier acerca de los patrones de ondas periódicas complejas?
18. Un sistema de sonido de alta fidelidad puede tener un intervalo de frecuencias que se extiende hasta 20,000 Hz o más. ¿Cuál es el propósito de la extensión de este intervalo?

### 21.7 De analógico a digital

19. Distingue entre analógico y digital para la forma en que se captura la señal sonora en un disco fonográfico frente a un CD.
20. ¿Por qué el uso de luz azul permite más información en un DVD?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

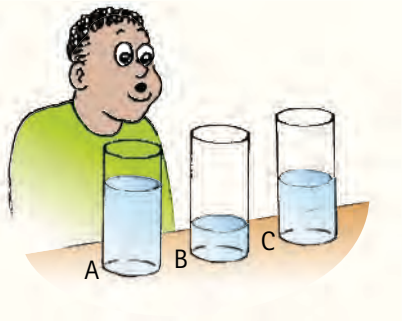
21. Consigue un reloj que haga tictac. Luego, para ver cuál oído tiene mejor audición, cúbrete un oído y descubre cuán lejos tu oído descubierto puede escuchar el tictac del reloj; repite con el otro oído. Observa también cómo mejora la sensibilidad de tu audición cuando haces una concha con la mano sobre la oreja.
22. Emite el sonido con el tono más grave que puedas; luego duplica la altura para ver cuántas octavas puede abarcar tu voz. Si eres cantante, ¿cuál es tu rango?
23. En una hoja de papel gráfico, construye un ciclo completo (un periodo de la frecuencia fundamental) de la onda compuesta de la Figura 21.6 al superponer varios desplazamientos verticales de la frecuencia fundamental y primero dos tonos parciales. Tu instructor puede mostrarte cómo hacerlo. Luego encuentra las ondas compuestas de tonos parciales de tu elección.

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

24. La frecuencia más alta que los seres humanos pueden escuchar es de unos 20,000 Hz. ¿Cuál es la longitud de onda del sonido en aire a temperatura ambiente a esta frecuencia? ¿Cuál es la longitud de onda de los sonidos más bajos que pueden escuchar, aproximadamente 20 Hz?
25. Una cuerda de violín que toca la nota la oscila a 440 Hz. ¿Cuál es el periodo de oscilación de la cuerda?
26. La cuerda de un cello que toca la nota do oscila a 264 Hz. ¿Cuál es el periodo de oscilación de la cuerda?
27. ¿Cuánto más intenso que el umbral de audición es un sonido de 10 dB? ¿30 db? ¿60 dB?
28. ¿Cuánto más intenso es un sonido de 40 dB que un sonido de 0 dB?
29. ¿Cuánto más intenso es un sonido de 40 dB que un sonido de 30 dB?
30. Cierta nota tiene una frecuencia de 1,000 Hz. ¿Cuál es la frecuencia de una nota una octava arriba de ella? ¿Dos octavas arriba de ella? ¿Una octava abajo de ella? ¿Dos octavas abajo de ella?
31. A partir de un tono fundamental, ¿cuántos armónicos hay entre la primera y segunda octavas? ¿Entre la segunda y la tercera octavas? (Observa la Figura 21.5 para comenzar.)

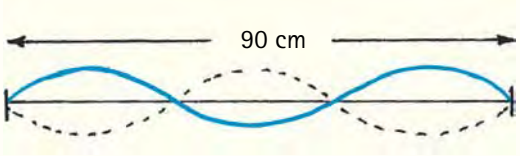
## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

32. Considera tres notas: 220 Hz, 440 Hz y 660 Hz. Clasifícalas de mayor a menor para:
    a. la altura.
    b. la frecuencia.
    c. la longitud de onda.
33. Soplas sobre las bocas de las botellas idénticas A, B y C, cada una con diferente cantidad de agua, como se muestra. De mayor a menor, clasifica la altura del sonido para cada una.

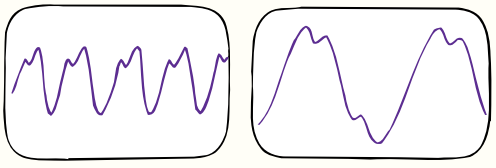



## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

34. Tu amigo dice que la frecuencia es una medida cuantitativa de la altura. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?
35. Conforme aumenta la altura del sonido, ¿qué ocurre con la frecuencia?
36. Tu compañero de clase dice que el timbre se refiere a la calidad de un sonido musical estable compuesto de una mezcla de armónicos de diferentes intensidades. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?
37. ¿Por qué las guitarras deben tocarse fuera del escenario antes de llevarse al escenario para un concierto? (*Sugerencia*: piensa en términos térmicos.)
38. Si el sonido se vuelve más sonoro, ¿cuál característica de la onda es probable que aumente: la frecuencia, la longitud de onda, la amplitud o la rapidez?
39. Explica cómo puedes bajar la altura de una nota en una guitarra al alterar (a) la longitud, (b) la tensión o (c) el grosor o masa de la cuerda.
40. ¿La altura de una nota depende de la frecuencia sonora, la sonoridad, la calidad o de todo ello?
41. Cuando una cuerda de guitarra se pulsa, se produce una onda estacionaria que hace que la caja de resonancia oscile con una gran amplitud sostenida, que empuja de ida y vuelta contra el aire circundante para generar sonido. ¿Cómo se compara la frecuencia del sonido resultante con la frecuencia de la onda estacionaria en la cuerda?
42. Las cuerdas de un arpa son de diferentes longitudes y producen distintas notas. ¿Cómo se producen notas diferentes en una guitarra, donde todas las cuerdas tienen la misma longitud?
43. Si una cuerda en vibración se hace más corta (como cuando pones un dedo sobre ella), ¿cómo afecta esto la frecuencia de vibración y la altura?
44. Una cuerda de nailon para guitarra vibra en un patrón de onda estacionaria, como se muestra en la figura. ¿Cuál es la longitud de onda de la onda?




45. ¿Por qué los diapasones con brazos largos vibran a una frecuencia más baja que los diapasones con brazos cortos? (*Sugerencia*: esta pregunta podría haberse planteado en el Capítulo 8.)
46. ¿Por qué el grosor de las cuerdas de bajos es mayor que el de las cuerdas de agudos?
47. ¿Cuál vibrará a una frecuencia más alta: la cuerda más gruesa o la más delgada de dos cuerdas de guitarra de la misma tensión y longitud?
48. ¿Por qué la cuerda de guitarra en vibración no suena tan fuerte cuando se monta en un banco de trabajo que cuando se monta en la guitarra?
49. Si una guitarra no tuviera caja de resonancia, ¿una cuerda pulsada vibraría más tiempo o menos tiempo? ¿Por qué?
50. Si tocas muy ligeramente en el punto medio de una cuerda de guitarra en vibración, puedes escuchar un tono que está una octava arriba de la fundamental para dicha cuerda. (Una octava es un factor de 2 en frecuencia.) Explica.
51. Si una cuerda de guitarra vibra en dos segmentos, ¿dónde puede sostenerse una pequeña hoja de papel doblado sin que salga volando? ¿Cuántas hojas de papel doblado podrían sostenerse de igual modo si la onda tuviera tres segmentos?
52. ¿Por qué las mismas notas en una trompeta y un saxofón suenan diferente cuando ambas se tocan con la misma altura y sonoridad?
53. La amplitud de una onda transversal en una cuerda estirada es el desplazamiento máximo de la cuerda desde su posición de equilibrio. ¿A qué corresponde la amplitud de una onda sonora longitudinal?
54. ¿Cuál de las dos notas musicales mostradas una a la vez en la pantalla de un osciloscopio tiene la mayor altura?



55. En los osciloscopios que se muestran en la pregunta anterior, ¿cuál pantalla muestra el sonido más intenso (si supones que se detectan con micrófonos similares)?

56. Para hacer música, Tom Senior sopla por los extremos de pajillas de distintas longitudes, con lo que pone a vibrar pequeñas columnas de aire. ¿Cuáles pajillas, las cortas o las largas, producen notas más graves? ¿Qué esperarías de la altura producida por el instrumento musical mucho más grande que está detrás de Tom, el cual utiliza columnas de aire resonante que se ponen a vibrar al golpear con paletas los extremos de los tubos?

57. ¿Cuál es una medición más objetiva: la intensidad sonora o la sonoridad? Defiende tu respuesta.
58. Una persona tiene un umbral de audición de 5 dB, y otra de 10 dB. ¿Cuál persona tiene la audición más desarrollada?
59. ¿Cómo es que un órgano electrónico puede imitar los sonidos de varios instrumentos musicales?
60. Después de inhalar gas helio, una persona habla con una voz muy aguda. Una de las razones para esto es la mayor rapidez del sonido en el helio que en el aire. ¿Por qué el sonido viaja más rápido en helio?
61. ¿Por qué tu voz suena más plena en la ducha?
62. El intervalo de frecuencias para un teléfono está entre 500 Hz y 3,000 Hz. ¿Por qué un teléfono no transmite bien la música?
63. ¿Cuántas octavas abarca la audición humana normal? ¿Cuántas octavas hay en el teclado de un piano común? (Si no estás seguro, busca y observa.)
64. La nota do medio en un piano tiene una frecuencia fundamental de unos 262 Hz. ¿Cuál es la frecuencia del segundo armónico de esta nota?
65. Si la frecuencia fundamental de una cuerda de guitarra es 220 Hz, ¿cuál es la frecuencia del segundo armónico? ¿Del tercer armónico?
66. Si la frecuencia fundamental de una cuerda de violín es 440 Hz, ¿cuál es la frecuencia del segundo armónico? ¿Del tercer armónico?
67. ¿Cuántos nodos, no incluidos los puntos extremos, hay en una onda estacionaria que tiene tres longitudes de onda de largo? ¿Cuántos nodos hay en una onda estacionaria con un largo de cuatro longitudes de onda?
68. En un concierto al aire libre, la altura de los tonos musicales *no* se modifica en un día ventoso. Explica.
69. El oído humano en ocasiones se llama analizador de Fourier. ¿Qué significa esto y por qué no es una descripción adecuada?
70. El ancho de un haz de láser fue y es significativo para leer CD y DVD. Cuanto más delgado sea el haz, más juntas pueden estar las series de depresiones (pits). ¿Por qué la luz láser azul permitirá pits más cercanos que la luz láser roja?
71. Elabora una pregunta de opción múltiple que distinga entre cualesquiera de los términos mencionados en el Resumen de términos.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

72. La luz amarillo verdosa emitida por el alumbrado público coincide con el color amarillo verdoso al que es más sensible el ojo humano. En consecuencia, un poste de alumbrado público de 100 W emite luz que se ve mejor de noche. De igual modo, las intensidades sonoras monitorizadas de los anuncios comerciales de TV son más sonoras que el sonido de la programación regular, aunque no exceden las intensidades máximas reguladas. Discute las frecuencias en las que los publicistas concentran el sonido de los comerciales.
73. Una guitarra y una flauta están afinadas entre sí. Discute cómo un cambio de temperatura podría alterar esta situación.
74. Tu compañero de clase dice que una serie armónica de frecuencias incluye la frecuencia fundamental y múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?
75. ¿Cómo puedes afinar la nota $A_3$ en un piano a su frecuencia adecuada de 220 Hz con la ayuda de un diapasón cuya frecuencia es 440 Hz? Discute.
76. Una trompeta tiene llaves y válvulas que permiten al trompetista cambiar la longitud de la columna de aire en vibración y la posición de los nodos. Un clarín no tiene claves ni válvulas, aunque puede reproducir varias notas. Discute cómo la corneta logra diferentes notas.
77. ¿Todas las personas de un grupo escuchan la misma música cuando escuchan con atención, como en la Figura 21.14? ¿Todas ven la misma imagen cuando ven una pintura? ¿Todas saborean el mismo sabor cuando beben el mismo vino? ¿Todas perciben el mismo aroma cuando huelen el mismo perfume? ¿Todas sienten la misma textura cuando tocan la misma tela? ¿Todas llegan a la misma conclusión cuando escuchan una presentación lógica de ideas?
78. Discute por qué es adecuado decir que tendrás una pérdida auditiva mucho mayor en tu vejez que la experimentada por tus abuelos.

# PARTE CUATRO Examen de práctica de opción múltiple

*Elige la MEJOR respuesta a cada una de las siguientes:*

1. Te balanceas de ida y vuelta en un columpio. Si en lugar de sentarte te pones de pie, el tiempo de un balanceo de ida y vuelta
   (a) se prolonga. (b) se acorta. (c) no cambia.
2. El tiempo que un péndulo tarda en balancearse de ida y vuelta se conoce como
   (a) frecuencia. (b) periodo. (c) longitud de onda. (d) amplitud.
3. El periodo de una onda de 10 Hz es
   (a) 1/10 s. (b) 1 s. (c) 10 s. (d) Ninguno de ellos.
4. Una onda transfiere
   (a) amplitud. (b) longitud de onda. (c) frecuencia. (d) energía.
5. Para encontrar la rapidez de una onda multiplicas su frecuencia por su
   (a) periodo. (c) amplitud.
   (b) longitud de onda. (d) Ninguno de éstos.
6. Las vibraciones de una onda transversal se mueven en una dirección
   (a) a lo largo de la onda. (c) Ambas.
   (b) perpendicular a la onda. (d) Ninguna de éstas.
7. Las vibraciones de una onda longitudinal se mueven en una dirección
   (a) a lo largo y paralela a la onda. (c) Ambas.
   (b) perpendicular a la onda. (d) Ninguna de éstas.
8. La interferencia es característica de las
   (a) ondas sonoras. (c) ondas en el agua.
   (b) ondas luminosas. (d) Todas ellas.
9. Las ondas estacionarias son resultado de
   (a) interferencia.
   (b) ondas que se traslapan en fase y fuera de fase.
   (c) ondas que se reflejan sobre ellas mismas.
   (d) Todas las anteriores.
10. El efecto Doppler ocurre cuando una fuente de sonido se
    (a) acerca a ti.
    (b) aleja de ti.
    (c) Ambos.
    (d) Ninguno.
11. Comparado con el sonido que escuchas de la sirena de un carro de bomberos estacionario, su sonido cuando se aproxima a ti tiene un aumento de
    (a) rapidez. (c) Ambas.
    (b) frecuencia. (d) Ninguna.
12. Las ondas de proa se producen por ondas de agua que
    (a) se traslapan entre sí.
    (b) interfieren constructivamente.
    (c) se mueven más lento que la fuente que las produce.
    (d) Todas las anteriores.
13. Las ondas de choque se producen por ondas de sonido que
    (a) se traslapan entre sí.
    (b) interfieren constructivamente.
    (c) se mueven más lento que la fuente que las produce.
    (d) Todas las anteriores.
14. Durante el tiempo que un avión produce un estampido sónico, la aeronave
    (a) rompe la barrera del sonido.
    (b) sale de una zambullida subsónica.
    (c) vuela más rápido que el sonido.
    (d) Todas las anteriores.
15. Las ondas sonoras que la mayoría de los seres humanos no pueden escuchar son
    (a) infrasónicas.
    (b) ultrasónicas.
    (c) Ambas.
    (d) Ninguna.
16. El sonido viaja en el aire mediante una serie de
    (a) compresiones.
    (b) rarefacciones.
    (c) Ambas.
    (d) Ninguna.
17. Las compresiones y rarefacciones en el sonido por lo general viajan
    (a) en la misma dirección.
    (b) en direcciones opuestas.
    (c) en ángulos rectos mutuos.
    (d) Ninguna de las anteriores.
18. El sonido viaja en
    (a) sólidos. (b) líquidos. (c) gases. (d) Todos los anteriores.
19. La rapidez del sonido es un poco mayor en un
    (a) día frío. (c) día con temperatura estable.
    (b) día caluroso. (d) Ninguno de los anteriores.
20. El sonido viajará más rápido en
    (a) una viga de acero. (c) el agua del océano.
    (b) un tablón de madera. (d) el aire en un globo.
21. La sonoridad de un sonido guarda más relación con su
    (a) frecuencia. (b) periodo. (c) longitud de onda. (d) amplitud.
22. Tu amigo afirma que, bajo todas las condiciones, cualquier onda de radio viaja más rápido que cualquier onda sonora. Tú
    (a) estás de acuerdo con tu amigo.
    (b) no estás de acuerdo con tu amigo.
23. Si golpeas un trozo de madera, ésta producirá un sonido característico relacionado con su
    (a) longitud de onda. (c) periodo.
    (b) amplitud. (d) frecuencia natural.
24. Cuando un objeto se pone a vibrar mediante una onda que tiene una frecuencia coincidente, lo que ocurre es
    (a) vibración forzada.
    (b) resonancia.
    (c) rarefacción.
    (d) reducción de amplitud.
25. Los dispositivos que cancelan el ruido usan la _____ del sonido.
    (a) destrucción. (c) resonancia.
    (b) interferencia. (d) amplificación.
26. El fenómeno de los batimientos es resultado de la _____ del sonido.
    (a) destrucción. (c) resonancia.
    (b) interferencia. (d) amplificación.
27. Un diapasón de 1,134 Hz suena al mismo tiempo cuando se golpea una nota de piano. Escuchas tres batimientos por segundo. La frecuencia de la cuerda del piano es
    (a) 1,131 Hz. (b) 1,134 Hz. (c) 1,137 Hz.
    (d) Se necesita más información.
28. La altura de un sonido se relaciona principalmente con su
    (a) intensidad. (b) frecuencia. (c) amplitud. (d) rapidez.
29. Comparado con un sonido de 60 decibeles, un sonido de 80 decibeles tiene una intensidad
    (a) 10 veces mayor.
    (b) 100 veces mayor.
    (c) 1,000 veces mayor.
    (d) más de 1,000 veces mayor.
30. Comparado con un tono fundamental, la frecuencia de su segundo armónico es
    (a) la mitad.
    (b) el doble.
    (c) la misma.
    (d) cuatro veces más.

*Después* de hacer elecciones razonadas, y discutirlas con tus amigos, encuentra las respuestas en la página S-1.

PARTE CINCO

# Electricidad y magnetismo

*Cuán fascinante que este imán atraiga al mundo entero cuando levanta estos clavos. Al tirón entre los clavos y la Tierra lo llamo fuerza gravitacional, y al tirón entre los clavos y el imán lo llamo fuerza magnética. Puedo ponerle nombre a estas fuerzas, pero eso no significa que las entiendo. Mi aprendizaje comienza cuando me doy cuenta de que hay una gran diferencia entre saber los nombres de las cosas y comprender realmente dichas cosas.*

22

CAPÍTULO 22

# Electrostática


22.1 Electricidad
22.2 Cargas eléctricas
22.3 Conservación de la carga
22.4 Ley de Coulomb
22.5 Conductores y aislantes
22.6 Carga
22.7 Polarización de la carga
22.8 Campo eléctrico
22.9 Potencial eléctrico


1

2

3

4

1 Jim Stith, ex presidente de la American Association of Physics Teachers (Asociación Estadounidense de Profesores de Física), demuestra un generador de Whimshurst que produce relámpagos en miniatura. 2 La naturaleza produce relámpagos más grandes y más refulgentes. 3 En el Bilkent Erzurum Laboratory School en Turquía, la profesora de física Z. Tugba Kahyaoglu coloca papel de aluminio en lo alto de un generador Van de Graaff. 4 Sus estudiantes se sorprenden cuando trozos del papel vuelan súbitamente debido a la repulsión electrostática.

Es razonable decir que, si Benjamín Franklin no hubiera nacido, la Guerra de Independencia de Estados Unidos habría terminado de un modo diferente. Esto porque Franklin, además de sus aportaciones a la Declaración de Independencia, persuadió a los franceses para que colocaran una flota de navíos cerca de la costa estadounidense e impedir así que los británicos reforzaran al general Cornwallis, a quien George Washington venció en una batalla decisiva de la guerra. La influencia de Franklin en Europa surgió del gran respeto que ganó como diplomático y científico líder en Estados Unidos. A cualquier lugar que iba en Francia, se aglomeraban multitudes que lo admiraban.

Franklin era un hombre de recursos. Sus logros como impresor, editor, baladista, inventor, filósofo, político, soldado, bombero, embajador, caricaturista y agitador antiesclavista fueron todos parte de su compromiso con el servicio público. Una parte muy importante de su legado tiene que ver con sus logros científicos.

Si bien se le recuerda en general por su invención del pararrayos, también inventó la armónica de vidrio, la estufa Franklin, las gafas bifocales y el catéter urinario flexible. Nunca patentó sus inventos y en su autobiografía afirmó: "...del mismo modo que disfrutamos los grandes beneficios de los inventos de otros, debemos agradecer la oportunidad de servir a los demás con cualquier invento de nuestra creación; y esto debemos hacerlo de un modo libre y generoso". A él se le recuerda en especial por sus investigaciones de la electricidad.

En una época cuando la electricidad se consideraba como dos tipos de fluido, llamados vítreo y resinoso, Franklin propuso que la corriente eléctrica era un fluido eléctrico bajo diferentes presiones. Fue el primero en calificar dichas presiones como positiva y negativa, y fue el primero en descubrir el principio de conservación de la carga. La invención del pararrayos de Franklin comenzó con una publicación en 1750. Propuso un experimento para probar que el relámpago era electricidad, para lo cual voló una cometa durante una tormenta, en una etapa antes de que se convirtiera en una tormenta eléctrica. La leyenda dice que con una cometa logró sacar chispas de una nube. Lo que no hizo fue volar su cometa en medio de una tormenta eléctrica, lo que otros por desgracia hicieron y fueron electrocutados. En vez de ello, la acumulación de carga eléctrica en la cuerda de la cometa de Franklin le demostró que los relámpagos eran eléctricos.

Su pararrayos fue resultado de sus experimentos que demostraron que los metales con una punta aguda podían reunir o descargar electricidad silenciosamente, lo que impedía la acumulación de carga en los edificios cuando sobrevolaban nubes cargadas. En el techo de su casa instaló barras de hierro, con puntas agudas, con un alambre que corría de la base de las barras al suelo. Su hipótesis era que las barras extraerían "fuego eléctrico" silenciosamente de las nubes antes de que golpearan como relámpago. Satisfecho de que los relámpagos podían evitarse, Franklin alentó la instalación de pararrayos en la Academy of Philadelphia (más tarde la University of Pennsylvania) y en el Congreso de Pennsylvania (más tarde el Salón de la Independencia) en 1752.

En reconocimiento a sus logros con la electricidad, Franklin recibió la medalla Copley de la *British Royal Society* en 1753, y en 1756 se convirtió en uno de los pocos estadounidenses en ser elegido miembro de la *Royal Society*. Con esta notoriedad estuvo en posición de influir en el resultado de la venidera Guerra de Independencia de Estados Unidos. Benjamín Franklin realmente reconfiguró el mundo.

## 22.1 Electricidad

**Electricidad** es el nombre que se da a una amplia diversidad de fenómenos eléctricos que, en una forma u otra, subyacen a casi todo lo que te rodea. Está en los relámpagos del cielo, en la chispa cuando enciendes un fósforo y es lo que mantiene unidos a los átomos para formar moléculas. El control de la electricidad es evidente en dispositivos tecnológicos de muchos tipos, desde las lámparas hasta las computadoras. En este capítulo investigarás la electricidad en reposo, la electricidad estática, o simplemente **electrostática**.

La electrostática involucra cargas eléctricas, las fuerzas entre ellas, el aura que las rodea y su comportamiento en los materiales. En el Capítulo 23 investigarás el movimiento de las cargas eléctricas o *corrientes eléctricas*. También estudiarás los voltajes que producen las corrientes y cómo pueden controlarse. En el Capítulo 24 estudiarás la relación de las corrientes eléctricas con el magnetismo y, en el Capítulo 25, aprenderás cómo pueden controlarse el magnetismo y la electricidad para operar dispositivos eléctricos, y cómo la electricidad y el magnetismo se relacionan para convertirse en luz.

En lugar de leer este capítulo en forma lenta y cuidadosa, intenta leerlo con rapidez, para luego leerlo de nuevo con más cuidado. La física se aprende por repetición, al repasar una y otra vez el mismo material, pues cada vez tendrá más sentido.

Para entender la electricidad es indispensable ir paso a paso, porque un concepto es el cimiento sobre el cual se basa el siguiente concepto. Así que, cuando estudies este material, pon atención extra. Puede ser difícil, confuso y frustrante si eres impaciente; pero, con esfuerzo cuidadoso, puede ser comprensible y gratificante. ¡Adelante!

**SCREENCAST: Electricidad**

## Fuerzas eléctricas

¿Y si hubiera una fuerza universal que, como la gravedad, variara inversamente con el cuadrado de la distancia pero fuera miles de millones de millones de veces más intensa? Si existiera tal fuerza y si fuera una fuerza de atracción como la gravedad, el Universo se juntaría en una bola apretada, con toda la materia tan junta como fuera posible. Pero supón que esta fuerza fuese una fuerza de repulsión y cada pedazo de materia repeliera a todos los demás. ¿Entonces qué? Entonces el Universo explotaría y se separaría en poco tiempo. Sin embargo, supón que el Universo consistiera en dos tipos de partículas: por decir, positivas y negativas. Supón que las positivas repelieran a las positivas pero atrajeran a las negativas y que las negativas repelieran negativas pero atrajeran positivas. En otras palabras, tipos iguales se repelen y tipos diferentes se atraen. Supón que hubiera igual número de cada tipo de partículas, ¡de modo que esta intensa fuerza estuviera perfectamente equilibrada! ¿Cómo sería el Universo? La respuesta es sencilla: sería como éste en el que vives. Porque existen tales partículas y existe tal fuerza. Se le llama *fuerza eléctrica*.

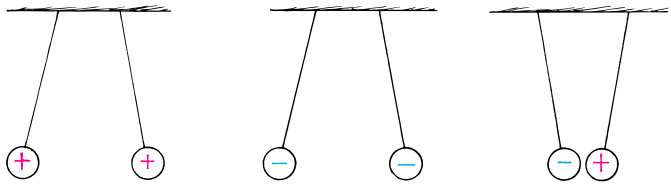



**FIGURA 22.1**
Cargas iguales se repelen. Cargas distintas se atraen.

En el interior de cada trozo de materia hay átomos. ¿Y qué hay adentro de cada átomo? Las cargas positivas y las negativas se mantienen unidas por la enorme atracción de la fuerza eléctrica. Al formar grupos compactos y mezclados en forma equitativa de positivas y negativas, las enormes fuerzas eléctricas se han equilibrado casi a la perfección. Cuando dos o más átomos se unen para formar una molécula, la molécula también contiene positivas y negativas en equilibrio. Y cuando billones de moléculas se combinan para formar un pedacito de materia, las fuerzas eléctricas se equilibran de nuevo. Entre dos piezas de materia ordinaria difícilmente existe atracción o repulsión eléctrica porque cada pieza contiene igual número de positivas y negativas. Entre la Tierra y la Luna, por ejemplo, no hay fuerza eléctrica. La fuerza gravitacional mucho más débil, que sólo atrae, permanece como la fuerza predominante entre estos cuerpos.

# 22.2 Cargas eléctricas

Los términos *positivo* y *negativo* se refieren a la *carga* eléctrica, la cantidad fundamental que subyace a todos los fenómenos eléctricos. Las partículas con carga positiva en la materia ordinaria son los protones, y las partículas con carga negativa son los electrones. El protón está incrustado en el núcleo de un átomo y no es móvil como el electrón más pequeño que puede deambular y hacer toda suerte de cosas útiles. Acompañando a los protones en el núcleo hay partículas neutras llamadas neutrones. Cuando dos átomos se acercan, el equilibrio entre las fuerzas de atracción y repulsión no es perfecto, porque los electrones se mueven dentro del volumen de cada átomo. Los átomos, entonces, pueden atraerse entre sí y formar una molécula. De hecho, todas las fuerzas de enlace químico que mantienen unidos a los átomos para formar moléculas son de naturaleza eléctrica. Cualquier persona que piense estudiar química primero debe saber algo de la atracción y la repulsión eléctricas y, antes de estudiar fenómenos eléctricos, debe saber algo de los átomos. Recuerda del Capítulo 11 algunos hechos importantes acerca de los átomos:

Cuáles cargas se llaman positivas y cuáles se llaman negativas es el resultado de una elección hecha por Benjamín Franklin. Pudo haber sido del modo contrario.

1. Todo átomo está compuesto de un *núcleo* con carga positiva rodeado de electrones con carga negativa.
2. Los electrones de todos los átomos son idénticos. Cada uno tiene la misma cantidad de carga negativa y la misma masa.
3. Los protones y los neutrones componen el núcleo. (La forma común del átomo de hidrógeno, que no tiene neutrón, es la única excepción.) Los protones son aproximadamente 1,800 veces más masivos que los electrones, pero portan una cantidad de carga positiva igual a la carga negativa de los electrones. Los neutrones tienen un poco más masa que los protones y no tienen carga neta.
4. Por lo general, los átomos tienen tantos electrones como protones, de modo que el átomo tiene una carga *neta* igual a cero.

¿Por qué los protones no jalan hacia el núcleo a los electrones con carga opuesta? Puedes pensar que los electrones se comportan de la misma forma que los planetas que orbitan al Sol. Pero no es así; esta explicación planetaria no es válida para los electrones. Cuando se descubrió el núcleo en 1911, los científicos sabían que los electrones no podían orbitar plácidamente alrededor del núcleo en la forma que la Tierra orbita al Sol. Sólo en aproximadamente una cien millonésima de segundo, de acuerdo con la física clásica, el electrón caería en espiral hacia el núcleo, y emitiría radiación electromagnética al hacerlo. De modo que se necesitaba una nueva teoría, la teoría llamada mecánica cuántica. Para describir el movimiento de los electrones, todavía se usa la terminología antigua, *órbita* y *orbital*, aunque la palabra preferida es *capa*, que sugiere que los electrones están dispersos sobre una región esférica. En la actualidad, la explicación de la estabilidad del átomo tiene que ver con la naturaleza ondulatoria de los electrones. Un electrón actúa como una onda y necesita cierta cantidad de espacio en relación con su longitud de onda. Cuando se aborde la mecánica cuántica, en el Capítulo 32, verás que el tamaño atómico está determinado por la cantidad mínima de "espacio libre" que necesita un electrón.

¿Por qué los protones en el núcleo no se repelen entre sí y salen disparados? ¿Qué mantiene unido al núcleo? La respuesta es que, además de las fuerzas eléctricas en el núcleo, fuerzas nucleares no eléctricas incluso más intensas mantienen unidos a los protones y superan la repulsión eléctrica. En el Capítulo 33 aprenderás sobre las fuerzas nucleares y cómo los neutrones ponen una distancia necesaria entre los protones.

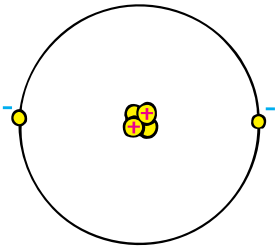


**FIGURA 22.2**
Modelo de un átomo de helio. El núcleo atómico está compuesto de dos protones y dos neutrones. Los protones con carga positiva atraen a dos electrones negativos.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Bajo las complejidades de los fenómenos eléctricos, se encuentra una regla fundamental de la que surgen casi todos los demás efectos. ¿Cuál es esta regla fundamental?**
2. **¿Cómo difiere la carga de un electrón de la carga de un protón?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Cargas iguales se repelen; cargas opuestas se atraen.
2. La carga de un electrón es igual en magnitud, pero opuesta en signo, a la carga de un protón.

## 22.3 Conservación de la carga

Una regla básica de la física es que, siempre que algo está cargado, no se crea ni se destruye ningún electrón. Los electrones simplemente se transfieren de un material a otro. La carga se *conserva*. En todo evento, ya sea a gran escala o al nivel atómico y nuclear, siempre se ha encontrado que aplica el principio de **conservación de la carga**. Jamás se ha encontrado prueba de la creación o destrucción de carga eléctrica neta.

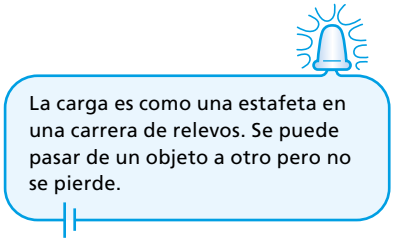


**FIGURA 22.3**
Los electrones se transfieren de la piel a la barra. Entonces la barra se carga negativamente. ¿La piel está cargada? ¿Cuánto, en comparación con la barra? ¿Positiva o negativamente?

La conservación de la carga se clasifica, junto con la conservación de la energía y de la cantidad de movimiento, como un principio fundamental significativo en física.

En un átomo neutro hay tantos electrones como protones, de modo que no hay carga neta. El positivo equilibra de manera exacta al negativo. Si un electrón se retira de un átomo, entonces el átomo ya no es neutro. Entonces el átomo tiene una carga positiva más (protón) que carga negativa (electrón) y se dice que está cargado positivamente.[1] Un átomo cargado se llama *ion*. Un *ion positivo* tiene una carga neta positiva. Un *ion negativo*, un átomo con uno o más electrones adicionales, está cargado negativamente.

De este modo se observa que un objeto que tenga distintos números de electrones y protones está cargado eléctricamente. Si tiene más electrones que protones, está cargado negativamente. Si tiene menos electrones que protones, está cargado positivamente.

Es interesante que cualquier objeto cargado eléctricamente tenga un exceso o una deficiencia de algún número entero de electrones, lo que significa que la carga del objeto es un múltiplo entero de la carga de un electrón. Los electrones no pueden dividirse en fracciones de electrones. La carga es "granular", o constituida por unidades elementales llamadas *cuantos*. Se dice que la carga está *cuantizada*, y el cuanto de carga más pequeño es el del electrón (o protón). En toda la materia, jamás se han observado unidades de carga más pequeñas.[2] Todos los objetos cargados a la fecha tienen una carga que es un múltiplo entero de la carga de un solo electrón o protón.

**pti**

- La electricidad estática es un problema en las bombas de gasolina. Incluso la más pequeña de las chispas puede encender los vapores de gasolina y causar incendios, con frecuencia letales. Una buena regla de seguridad es tocar metal y descargar la carga estática de tu cuerpo antes de servir el combustible. Además, no uses el teléfono celular cuando sirvas combustible.

**PUNTO DE CONTROL**

**Si arrastras electrones hacia tus pies mientras caminas sobre una alfombra, ¿estás cargado negativa o positivamente?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Tienes más electrones después de arrastrar los pies, de modo que estás cargado negativamente (y la alfombra está cargada positivamente).

## TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA Y CHISPAS

La carga eléctrica puede ser peligrosa. Hace 200 años había niños pequeños llamados pajes de pólvora que corrían descalzos bajo las cubiertas de los buques de guerra para llevar sacos de pólvora negra a los cañones de la parte superior. Era ley naval que esta tarea se realizara descalzo. ¿Por qué? Porque era importante que no se acumulara carga estática en la pólvora sobre los cuerpos de los niños mientras corrían de un lado a otro. Los pies desnudos se arrastraban sobre las cubiertas mucho menos que los zapatos y garantizaban que la carga no se acumulara y pudiera producir una chispa de ignición y una explosión.

La carga estática es un peligro en muchas industrias en la actualidad, no por las explosiones, sino porque los delicados circuitos electrónicos pueden destruirse por las cargas estáticas. Algunos componentes de los circuitos son tan sensibles que las chispas de electricidad estática pueden "freírlos". Los técnicos en electrónica con frecuencia usan ropa de telas especiales con alambres de aterrizaje entre sus mangas y sus calcetines. Algunos usan brazaletes especiales que están conectados a una superficie aterrizada de modo que las cargas estáticas no se acumulen cuando mueven una silla, por ejemplo. Cuanto más pequeño sea el circuito electrónico, más peligrosas serán las chispas que puede producir un cortocircuito en los elementos del circuito.

[1]Cada protón tiene una carga $e+$, igual a $+1.6 \times 10^{-19}$ coulomb. Cada electrón tiene una carga $e-$, igual a $-1.6 \times 10^{-19}$ coulomb. Por qué partículas tan diferentes tienen la misma magnitud de carga es una pregunta sin respuesta en la física. La igualdad de las magnitudes se ha analizado con una gran exactitud.

[2]Sin embargo, dentro del núcleo atómico, partículas elementales llamadas quarks portan cargas de 1/3 y 2/3 la magnitud de la carga del electrón. Cada protón y cada neutrón están constituidos de tres quarks. Dado que los quarks siempre existen en tales combinaciones y nunca se han encontrado separados, la regla del múltiplo entero de carga del electrón también se sostiene para los procesos nucleares.

## 22.4 Ley de Coulomb

**SCREENCAST: Ley de Coulomb**

La fuerza eléctrica, al igual que la fuerza gravitacional, disminuye inversamente como el cuadrado de la distancia entre los cuerpos cargados. Esta relación, descubierta por Charles Coulomb en el siglo XVIII, se llama **ley de Coulomb**. Afirma que, para dos objetos cargados que son mucho más pequeños que la distancia entre ellos, la fuerza entre los dos objetos varía directamente como el producto de sus cargas e inversamente como el cuadrado de la distancia de separación. (Repasa la ley del inverso al cuadrado en la Figura 9.5.) La fuerza actúa a lo largo de una línea recta de un objeto cargado al otro. La ley de Coulomb puede expresarse como:

$$F = k\frac{q_1 q_2}{d^2}$$

donde $d$ es la distancia entre las partículas cargadas, $q_1$ es la cantidad de carga de una partícula, $q_2$ es la cantidad de carga de la otra partícula y $k$ es la constante de proporcionalidad.

La ley de Coulomb es como la ley de gravitación de Newton. Pero, a diferencia de la gravedad, las fuerzas eléctricas pueden ser de atracción o repulsión.

La unidad de carga del SI es el **coulomb**, que se abrevia C. Resulta que 1 C es la unidad de carga asociada con 6.25 trillones de electrones. Esto puede parecer un número enorme de electrones, pero sólo representa la cantidad de carga que fluye en una bombilla común de 100 watts en poco más de un segundo.

La constante de proporcionalidad $k$ en la ley de Coulomb es similar a $G$ en la ley de gravitación de Newton. En lugar de ser un número muy pequeño como $G$ ($6.67 \times 10^{-11}$), la constante de proporcionalidad eléctrica $k$ es un número muy grande. Es aproximadamente

$$9{,}000{,}000{,}000\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$$

o, en notación científica, $k = 9 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$. La unidad $\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$ no es central para la presente discusión; tan sólo convierte el lado derecho de la ecuación de la ley de Coulomb a la unidad de fuerza, el newton (N). Lo que importa es la gran magnitud de $k$. Si, por ejemplo, un par de partículas con cargas iguales de 1 C cada una estuvieran separadas 1 m, la fuerza de repulsión entre ellas sería de 9 mil millones de N.[3] ¡Esto sería más de 10 veces el peso de un buque de guerra! Obviamente, tales cantidades de carga neta no existen en el entorno cotidiano.

Así que la ley de gravitación de Newton para masas es similar a la ley de Coulomb para cuerpos con carga eléctrica.[4] La diferencia más importante entre las fuerzas gravitacional y eléctrica es que las fuerzas eléctricas pueden ser o de atracción o de repulsión, en tanto que las fuerzas gravitacionales sólo son de atracción. La ley de Coulomb subyace a las fuerzas de enlace entre las moléculas que son esenciales en el campo de la química.

### PUNTO DE CONTROL

**1. El protón que está en el núcleo del átomo de hidrógeno atrae al electrón que lo orbita. En relación con esta fuerza, ¿el electrón atrae al protón con menos fuerza, con más fuerza o con la misma cantidad de fuerza?**

[3]Compara esto con la fuerza de atracción gravitacional entre dos masas de 1 kg separadas 1 m: $6.67 \times 10^{-11}$ N. Ésta es una fuerza extremadamente pequeña. Para que la fuerza sea 1 N, ¡las masas separadas 1 m tendrían que ser casi de 123,000 kg cada una! Las fuerzas gravitacionales entre objetos ordinarios son excesivamente pequeñas, en tanto que las fuerzas eléctricas entre objetos ordinarios pueden ser demasiado enormes. Uno no las percibe porque, en general, positivos y negativos se equilibran. Incluso para objetos muy cargados, la razón de electrones a protones suele ser menor que una parte en un trillón de trillones.

[4]De acuerdo con la teoría cuántica, una fuerza que varía inversamente como el cuadrado de la distancia conlleva el intercambio de partículas sin masa. El intercambio de fotones sin masa es responsable de la fuerza eléctrica, y el intercambio de gravitones sin masa explica la fuerza gravitacional. Algunos científicos buscan una relación incluso más profunda entre la gravedad y la electricidad. Albert Einstein pasó la última parte de su vida buscando con poco éxito una "teoría de campo unificado". En fecha más reciente, la fuerza eléctrica se ha unificado con una de las dos fuerzas nucleares, la *fuerza débil*, que es importante en el decaimiento radiactivo.

2. **Si un protón a una distancia particular de una partícula cargada se repele con una fuerza dada, ¿en cuánto disminuirá la fuerza cuando el protón esté tres veces más lejos de la partícula? ¿Cuando esté cinco veces más lejos?**
3. **¿Cuál es el signo de la carga de la partícula en este caso?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La misma cantidad de fuerza, de acuerdo con la tercera ley de Newton, ¡mecánica básica! Recuerda que una fuerza es una interacción entre dos cosas; en este caso, entre el protón y el electrón. Ellos se jalan entre sí de la misma forma.
2. Disminuye a 1/9 de su valor original; a 1/25 su valor original.
3. Positivo.

## 22.5 Conductores y aislantes

Es fácil establecer una corriente eléctrica en un metal porque uno o más de los electrones de la capa exterior de sus átomos no están anclados a los núcleos de átomos particulares, sino que tienen libertad de vagar en el material. A tal material se le llama buen **conductor**. Cualquier metal es un buen conductor de corriente eléctrica por la misma razón que es un buen conductor del calor: los electrones en la capa atómica exterior de sus átomos están "sueltos". Los metales costosos como la plata, el oro y el platino están entre los mejores conductores, no se corroen y se utilizan comúnmente en cantidades pequeñas para productos de alto valor. El cobre y el aluminio suelen usarse en los sistemas de cableado eléctrico debido a su buen desempeño y costo más bajo.

Los electrones en otros materiales (caucho y vidrio, por ejemplo) están estrechamente ligados y pertenecen a átomos particulares. No tienen libertad de vagar entre otros átomos del material. En consecuencia, no es fácil hacerlos fluir. Estos materiales son malos conductores de corriente eléctrica por la misma razón por la que generalmente son malos conductores del calor. A dicho material se le llama buen **aislante**. El vidrio es un aislante muy bueno y se utiliza para mantener alejados los alambres eléctricos de las torres metálicas que los transportan. Muchos plásticos también son buenos aislantes, razón por la que el alambrado de tu casa está cubierto con una capa de plástico.

Todas las sustancias pueden clasificarse de acuerdo con su capacidad para conducir carga eléctrica. Los primeros de la lista serían los conductores y los últimos serían los aislantes. Los extremos de la lista están muy separados. La conductividad de un metal, por ejemplo, puede ser más de un trillón de veces mayor que la conductividad de un aislante como el vidrio.

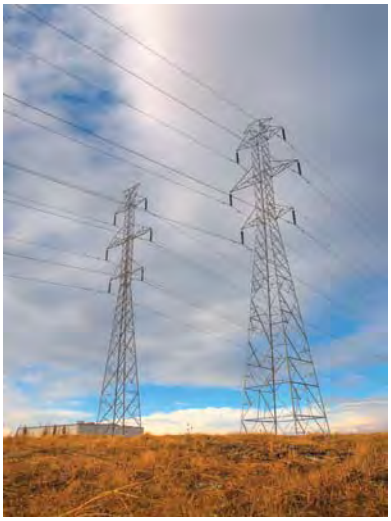


**FIGURA 22.4**
Es más fácil establecer una corriente eléctrica a través de cientos de kilómetros de alambre metálico que a través de unos pocos centímetros de material aislante.

### Semiconductores

Algunos materiales, como el germanio (Ge) y el silicio (Si), no son ni buenos conductores ni buenos aislantes. Dichos materiales caen a la mitad del intervalo de resistividad eléctrica, al ser buenos aislantes en su forma cristalina pura y convertirse en excelentes conductores cuando incluso 1 átomo en 10 millones se sustituye con una impureza que agrega o retira un electrón de la estructura cristalina. Un material que se elabora para comportarse a veces como un aislante y a veces como un conductor se llama **semiconductor**. Son delgadas capas de materiales semiconductores emparedadas juntas las que constituyen a los *transistores*, que se usan para controlar el flujo de electrones en los circuitos, para detectar y amplificar señales de radio y para producir oscilaciones en los transmisores; también actúan como interruptores digitales. Estos pequeños sólidos fueron los primeros componentes eléctricos en los cuales materiales con diferentes características eléctricas no estaban interconectados con alambres sino que se unían

**pti**

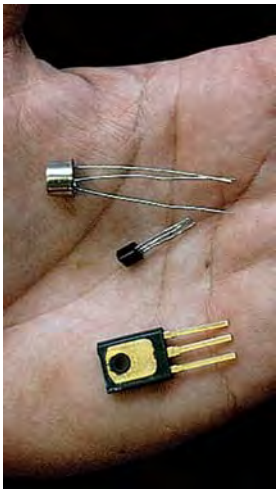
- El memristor (abreviatura para *resistor de memoria*) utiliza una delgada película de óxido de titanio emparedado entre dos capas de platino. En él caben chips de una forma 100 veces más densa que en los transistores y recuerda la información sin energía eléctrica. ¿Los memristores aparecerán pronto en computadoras y dispositivos inalámbricos?

físicamente en una estructura. Necesitan muy poca potencia y duran en forma indefinida con el uso normal.

Un semiconductor también conducirá cuando sobre él brille una luz del color adecuado. Una placa de selenio puro por lo general es un buen aislante, y cualquier carga eléctrica acumulada sobre su superficie permanecerá durante largos periodos en la oscuridad. Sin embargo, si la placa se expone a la luz, la carga fluye casi de inmediato. Si una placa de selenio cargada se expone a un patrón de luz, como el patrón de luz y oscuridad que constituye esta página, la carga fluirá sólo de las áreas expuestas a la luz. Si un polvo plástico negro se cepillara sobre su superficie, el polvo se pegaría sólo a las áreas cargadas donde la placa no fue expuesta a la luz. Ahora, si una hoja de papel con una carga eléctrica en el reverso se pusiera sobre la placa, el polvo plástico negro se atraería hacia el papel y formaría el mismo patrón que, por decir, el de esta página. Éstos son los principios básicos de las fotocopiadoras.

## Superconductores

Un conductor ordinario tiene sólo una resistencia pequeña al flujo de carga eléctrica. Un aislante tiene mucho mayor resistencia (el tema de la resistencia eléctrica se abordará en el Capítulo 23). Es sorprendente que en ciertos materiales a temperaturas suficientemente bajas desaparezca la resistencia eléctrica. Los materiales adquieren resistencia cero (conductividad infinita) al flujo de carga. Tal material se denomina **superconductor**. Una vez que se establece corriente eléctrica en un superconductor, los electrones fluyen de manera indefinida. Sin resistencia eléctrica, la corriente pasa por un superconductor sin perder energía; no ocurren pérdidas por calor cuando fluye carga. La superconductividad de los metales cerca del cero absoluto se descubrió en 1911. En 1987 se descubrió la superconductividad a una temperatura "alta" (arriba de 100 K) en un compuesto no metálico. La superconductividad ha progresado desde entonces, con aplicaciones que incluyen líneas de transmisión eléctrica de baja pérdida y vehículos de levitación magnética de alta rapidez que se espera que sustituyan a los ferrocarriles tradicionales.



(a)

(b)

**FIGURA 22.5**
(a) Tres transistores. (b) Muchos transistores en un circuito integrado.

# 22.6 Carga

Para cargar las cosas se transfieren electrones de un lugar a otro. Esto se puede hacer mediante *contacto* físico, como ocurre cuando las sustancias se frotan una con otra o simplemente se tocan. O se puede redistribuir la carga sobre un objeto con sólo poner un objeto cargado cerca de él; a esto se llama *inducción*.

## Carga mediante fricción y contacto

Todo mundo está familiarizado con los efectos eléctricos producidos por la fricción. Puedes frotar la piel de un gato y escuchar el crepitar de las chispas que se producen, o peinar tu cabello limpio y seco enfrente de un espejo en una habitación oscura y ver y escuchar las chispas. Puedes arrastrar los zapatos por una alfombra y sentir un hormigueo a medida que las cargas fluyen cuando tocas la perilla de la puerta. Habla con algunos ancianos y te contarán del sorprendente choque que recibían cuando se deslizaban por el recubrimiento plástico del asiento cuando estaban en un automóvil estacionado (Figura 22.6). La carga se transfiere entre las ropas en una secadora. En todos estos casos, los electrones se transfieren por fricción cuando un material frota contra otro.

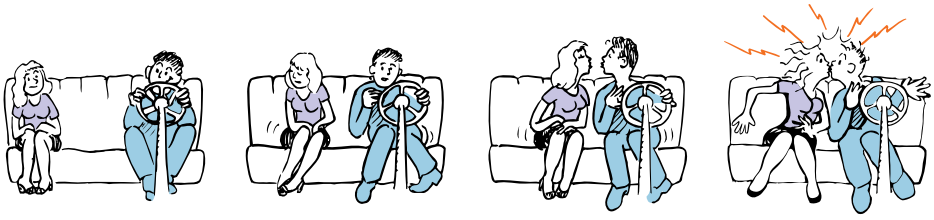


**FIGURA 22.6**
Carga por fricción y luego por contacto.

Los electrones pueden transferirse de un material a otro por simple contacto. Por ejemplo, cuando una barra con carga negativa se pone en contacto con un objeto neutro, algunos electrones se moverán hacia el objeto neutro. Este método de cargar se llama simplemente **carga por contacto**. Si el objeto es un buen conductor, los electrones se dispersarán hacia todas partes de su superficie porque los electrones transferidos se repelen entre sí. Si es un mal conductor, puede ser necesario tocar la barra en varios lugares sobre el objeto para obtener una distribución de carga más o menos uniforme.

## Carga por inducción

Si pones un objeto cargado *cerca* de una superficie conductora, los electrones se mueven en el material de la superficie, incluso sin contacto físico. Considera las dos esferas metálicas aisladas, A y B, de la Figura 22.7. En la parte (a) las esferas se tocan entre sí, de modo que, en efecto, éstas forman un solo conductor descargado. En la parte (b), cuando una barra con carga negativa se acerca a A, los electrones en el metal, al tener libertad para moverse, se repelen lo más lejos posible hasta que su repulsión es tan grande que equilibra la influencia de la barra: la carga se redistribuye. En las partes (c) y (d), si las esferas están separadas mientras la barra todavía está presente, cada una tendrá carga igual y opuesta. Ésta es **carga por inducción**. La barra cargada nunca toca las esferas, y la barra conserva la misma carga que tenía en un inicio.

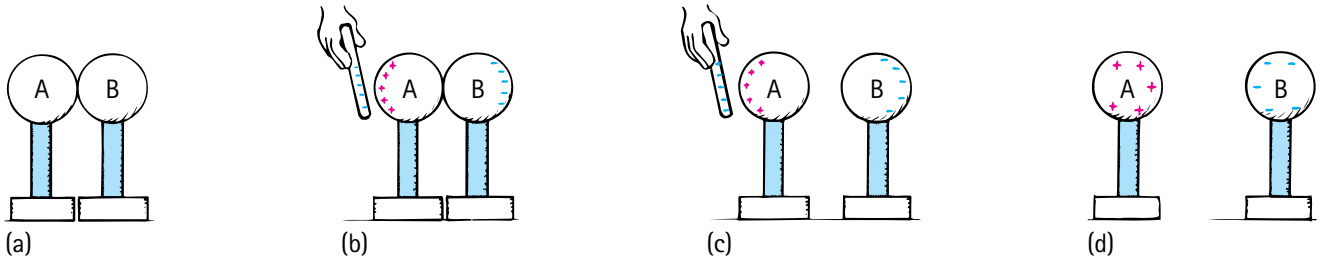



**FIGURA 22.7**
Carga por inducción.

De igual modo puedes cargar una sola esfera por inducción si la tocas cuando diferentes partes de ella tienen distinta carga. Considera la esfera metálica que cuelga de un hilo no conductor, como se muestra en la Figura 22.8. Cuando tocas la superficie metálica con un dedo, proporcionas una ruta para que la carga fluya hacia o desde un depósito muy grande de carga eléctrica: la tierra. Se dice que *aterrizas* (*pones a tierra*) la esfera, un proceso que puede dejarla con una carga neta. En el Capítulo 23 se regresará a esta idea de la puesta a tierra, cuando estudies las corrientes eléctricas.

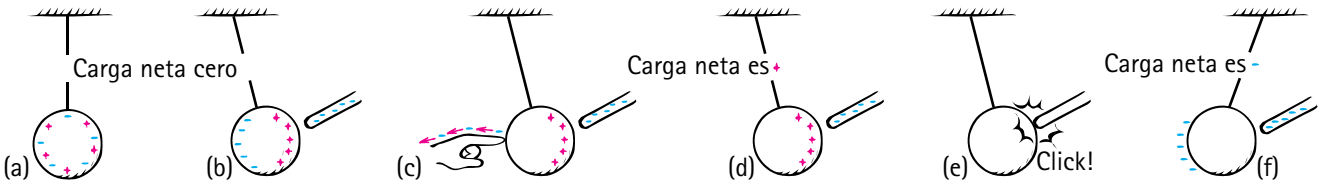



**FIGURA 22.8**
Etapas de inducción de carga por puesta a tierra. (a) La carga neta sobre la esfera metálica es cero. (b) La redistribución de carga se induce sobre la esfera por la presencia de la barra cargada. La carga neta sobre la esfera todavía es cero. (c) Tocar el lado negativo de la esfera retira electrones por contacto. (d) Esto deja a la esfera con carga positiva. (e) La esfera se atrae con más fuerza hacia la barra negativa y, cuando la toca, ocurre la carga por contacto. (f) La esfera negativa se repele por la barra que todavía tiene algo de carga negativa.

La carga por inducción ocurre durante las tormentas eléctricas. Los fondos de las nubes con carga negativa inducen una carga positiva sobre la superficie del suelo bajo ellas. Como se mencionó al comienzo de este capítulo, Benjamín Franklin fue el primero en demostrar esto cuando su famoso experimento del vuelo de cometa comprobó que los relámpagos eran un fenómeno eléctrico.[5] El relámpago es una descarga eléctrica entre una nube y el suelo con carga opuesta, o entre regiones de las nubes con cargas opuestas.

Franklin también descubrió que la carga fluye con facilidad hacia o desde puntas metálicas agudas y diseñó el primer pararrayos. El principal propósito del pararrayos es evitar un incendio provocado por un relámpago. Si, por alguna razón, no se drena suficiente carga del aire a la barra y el relámpago golpea de cualquier forma, éste puede atraerse hacia la barra y tomar una ruta directa hacia el suelo, lo que por tanto salva al edificio.

**FIGURA 22.9**
La carga negativa en el fondo de la nube induce una carga positiva en la superficie del suelo bajo ella.

**FIGURA 22.10**
Los pararrayos se conectan mediante alambres de uso rudo, por lo que pueden conducirse a tierra corrientes muy grandes si pega el relámpago. Con mucha frecuencia, la carga se escapa por la punta afilada de la barra para evitar un relámpago.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Las cargas inducidas en las esferas A y B de la Figura 22.7 tendrían que ser exactamente iguales y opuestas?**
2. **¿Por qué la barra negativa de la Figura 22.7 tiene la misma carga antes y después de cargar las esferas, mas no cuando tiene lugar la carga, como en la Figura 22.8?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Sí, porque cada carga positiva sobre la esfera A resulta de un electrón tomado de A y movido a B. Esto es como retirar ladrillos de la superficie de un camino de ladrillos y colocarlos todos en la acera. El número de ladrillos en la acera coincide exactamente con el número de agujeros en el camino. Del mismo modo, el número de electrones adicionales en B coincidirá de manera exacta con el número de "agujeros" (cargas positivas) que quedan en A. La carga positiva es resultado de un electrón ausente.
2. En el proceso de carga de la Figura 22.7 y alguna de las esferas. Sin embargo, en la Figura 22.8, la barra tocó la esfera con carga positiva. Una transferencia de carga por contacto redujo la carga negativa de la barra.

**pti**

- El relámpago ocurre principalmente en climas cálidos. A medida que el vapor de agua caliente se eleva en el aire, éste roza los cristales de hielo en el aire de la parte superior, lo que produce una carga similar a la que ocurre cuando frotas los pies sobre una alfombra. Los cristales de hielo obtienen una ligera carga positiva y la corriente ascendente los lleva hacia la parte superior de la nube. De modo que la parte superior de una nube por lo general tiene carga positiva y la parte inferior tiene carga negativa. El relámpago es el rayo que forma un arco entre estas regiones y entre la nube y el suelo bajo ella.

[5]Benjamín Franklin inventó muchas cosas que mejoraron la calidad de vida. ¡Sin duda fue un hombre muy ocupado! Sólo una tarea tan importante como ayudar a formar el sistema de gobierno de Estados Unidos impidió que dedicara todavía más de su tiempo a su actividad favorita: la investigación científica de la naturaleza.

La polarización eléctrica explica lo "pegajoso" de las moléculas de agua. Las cargas opuestas entre las moléculas de agua se atraen, razón por la cual el agua en la atmósfera se condensa a una temperatura mucho más alta que los gases de las moléculas no polarizadas, como el nitrógeno y el dióxido de carbono, aun cuando ambas sean más pesadas y tengan un movimiento más lento que el $H_2O$.

## 22.7 Polarización de la carga

La carga por inducción no se restringe a los conductores. Cuando una barra cargada se acerca a un aislante, no hay electrones libres que puedan migrar por el material aislante. En vez de ello, se presenta un reordenamiento de cargas dentro de los átomos y las moléculas (Figura 22.11). Aunque los átomos no se mueven de sus posiciones relativamente fijas, sus "centros de carga" se mueven. Un lado del átomo o de la molécula se induce a volverse más negativo (o positivo) que el lado opuesto. Se dice que el átomo o la molécula están **eléctricamente polarizados**. Si la barra cargada es negativa, por ejemplo, entonces la parte positiva del átomo o la molécula se jala en una dirección hacia la barra, y el lado negativo del átomo o la molécula se empuja en una dirección que se aleja de la barra. Las partes positiva y negativa de los átomos y las moléculas se alinean. Están eléctricamente polarizadas.

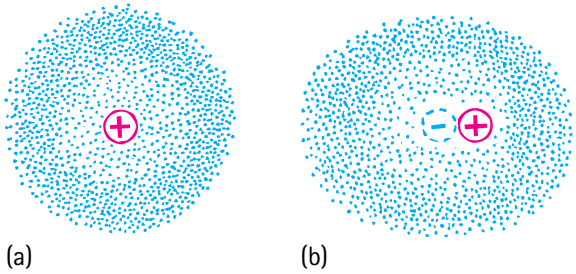



**FIGURA 22.11**
Un electrón que se mueve en forma frenética alrededor del núcleo atómico produce una nube de electrones. (a) El centro de la nube negativa por lo general coincide con el centro del núcleo positivo en un átomo. (b) Cuando una carga negativa externa se acerca por la derecha, como sobre un globo cargado, la nube de electrones se distorsiona de modo que los centros de carga negativa y positiva ya no coinciden. El átomo ahora está eléctricamente polarizado.

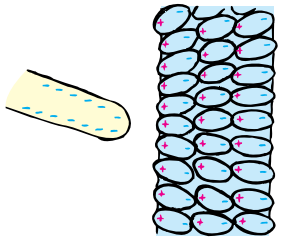


**FIGURA 22.12**
Todos los átomos o moléculas cerca de la superficie se vuelven eléctricamente polarizados. Cargas superficiales de igual magnitud y signo opuesto se inducen sobre las superficies opuestas del material.

Puedes entender por qué los pedazos de papel eléctricamente neutros se atraen hacia un objeto cargado, por ejemplo, un peine que te pasas por el cabello. Cuando el peine cargado se acerca, las moléculas del papel se polarizan. El signo de la carga más cercana al peine es opuesta a la carga del peine. Las cargas del mismo signo están un poco más distantes. La cercanía gana (ley del inverso al cuadrado) y los pedazos de papel experimentan una atracción neta. En ocasiones se agarrarán del peine y luego saldrán volando en forma súbita. Esta repulsión ocurre porque los pedazos de papel adquieren el mismo signo de carga que el peine cargado cuando entran en contacto. Frota un globo inflado en tu cabello y se cargará. Coloca el globo contra la pared y se pegará. Esto se debe a que la carga sobre el globo induce una carga superficial opuesta sobre la pared. De nuevo, la cercanía gana, porque la carga sobre el globo está un poco más cerca de la carga inducida opuesta que de la carga del mismo signo (Figura 22.14).

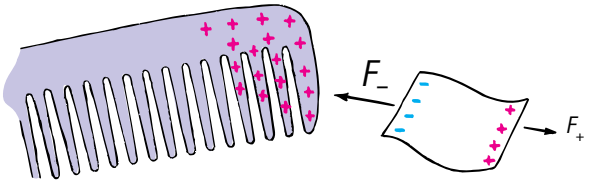



**FIGURA 22.13**
Un peine cargado atrae un pedazo de papel no cargado porque la fuerza de atracción para la carga más cercana es mayor que la fuerza de repulsión para la carga más lejana.

Muchas moléculas —$H_2O$, por ejemplo— están eléctricamente polarizadas en sus estados normales. La distribución de carga eléctrica no está muy bien equilibrada. Existe un poco más de carga negativa en un lado de la molécula que en el otro (Figura 22.15). Se dice que tales moléculas son *dipolos eléctricos*.

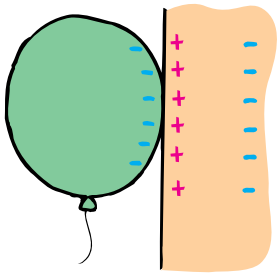


**FIGURA 22.14**
El globo con carga negativa polariza los **átomos** de la pared de madera y crea una superficie con carga positiva, de modo que el globo se pega a la pared.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Una barra con carga negativa se acerca a unos pequeños pedazos de papel neutro. Los lados positivos de las moléculas en el papel son atraídos hacia la barra y los lados negativos de las moléculas se repelen. ¿Por qué no se cancelan estas fuerzas de atracción y repulsión?**
2. **En un sentido humorístico, si frotas un globo en tu cabello y pones la cabeza contra la pared, ¿se pegará a la pared como lo haría el globo?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Los lados positivos tan sólo están más cerca de la barra. Por tanto, experimentan una mayor fuerza eléctrica que los lados negativos más alejados. En consecuencia, se dice que la cercanía gana. ¿Puedes ver que una barra positiva todavía produciría atracción?
2. Lo haría, si tuvieras la cabeza hueca; esto es: si la masa de tu cabeza fuera aproximadamente la del globo, de modo que la fuerza producida sería evidente.

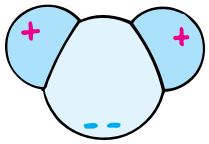


**FIGURA 22.15**
Una molécula de $H_2O$ es un dipolo eléctrico.

## 22.8 Campo eléctrico

Las fuerzas eléctricas, al igual que las fuerzas gravitacionales, actúan entre cosas que no están en contacto unas con otras. Tanto para la electricidad como para la gravedad existe un *campo de fuerza* que influye en los cuerpos cargados y masivos, respectivamente. Recuerda, del Capítulo 9, que las propiedades del espacio que rodea a cualquier cuerpo masivo se alteran de tal forma que otro cuerpo masivo introducido a esta región experimentará una fuerza. La fuerza es gravitacional, y el espacio alterado que rodea a un cuerpo masivo es su *campo gravitacional*. Puedes considerar que cualquier otro cuerpo masivo interactúa con el campo y no directamente con el cuerpo masivo que lo produce. Por ejemplo, cuando una manzana cae de un árbol, se dice que interactúa con la Tierra, pero también puedes pensar que la manzana interactúa con el campo gravitacional de la Tierra. El campo desempeña una función de intermediario en la fuerza entre los cuerpos. A menudo se cree que los cohetes distantes y objetos parecidos interactúan con los campos gravitacionales en lugar de con las masas de la Tierra y otros cuerpos responsables de los campos. Así como el espacio alrededor de un planeta (y alrededor de cualquier otro cuerpo masivo) está lleno con un campo gravitacional, el espacio alrededor de todo cuerpo cargado eléctricamente está lleno con un **campo eléctrico**, un aura energética que se extiende por el espacio.

Los tiburones y algunas especies relacionadas de peces están equipados con receptores especializados en sus hocicos que perciben campos eléctricos muy débiles generados por otras criaturas en el agua de mar.

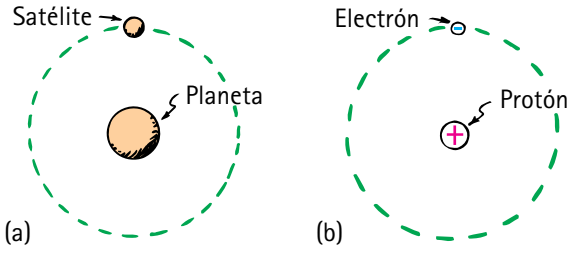



**FIGURA 22.16**
(a) Una fuerza gravitacional mantiene al satélite en órbita alrededor del planeta y (b) una fuerza eléctrica mantiene al electrón en órbita alrededor del protón. En ambos casos, no hay contacto entre los cuerpos. Se dice que los cuerpos en órbita interactúan con los *campos de fuerza* del planeta y el protón y en todas partes están en contacto con dichos campos. Por ende, la fuerza que un cuerpo con carga eléctrica ejerce sobre otro puede describirse como la interacción entre un cuerpo y el campo establecido por el otro.

Un campo eléctrico tiene tanto magnitud (intensidad) como dirección. La magnitud del campo en cualquier punto es simplemente la fuerza por unidad de carga. Si un cuerpo con carga $q$ experimenta una fuerza $F$ en algún punto del espacio, entonces el campo eléctrico $E$ en dicho punto es:

$$E = \frac{F}{q}$$

El campo eléctrico se representa con flechas de vectores en la Figura 22.17a. La dirección del campo se muestra mediante los vectores y se define como la dirección en la cual se empujaría a una pequeña carga de prueba positiva en reposo.[6] La dirección de la fuerza y la del campo en cualquier punto son iguales. Por tanto, en la figura se observa que todos los vectores apuntan hacia el centro de la esfera con carga negativa. Si la esfera tuviera carga positiva, los vectores apuntarían hacia el otro lado de su centro porque se repelería una carga de prueba positiva en la vecindad.

**SCREENCAST: Campos eléctricos**

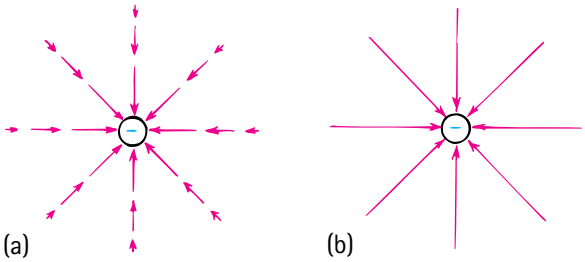



**FIGURA 22.17**
Representaciones del campo eléctrico en torno a una carga negativa: (a) una representación vectorial y (b) una representación con líneas de fuerza.

## HORNO DE MICROONDAS

Imagina un encierro de bolas de *ping-pong* entre algunas raquetas, todas en reposo. Ahora imagina que las raquetas súbitamente comienzan a aletear de ida y vuelta como hélices semigiratorias, y que golpean las bolas de *ping-pong* vecinas. Las bolas se energizan y se mueven en todas direcciones. Un horno de microondas funciona de manera similar. Las raquetas son moléculas de agua (u otras moléculas polares) que se ponen a aletear de ida y vuelta al ritmo de las microondas oscilantes en el encierro. Las bolas de *ping-pong* son moléculas no polares que constituyen el volumen del alimento que se va a cocinar.

Cada molécula de $H_2O$ es un dipolo eléctrico que se alinea con un campo eléctrico justo como la aguja de una brújula se alinea con un campo magnético. Cuando el campo eléctrico oscila, las moléculas de $H_2O$ también oscilan. Las moléculas de $H_2O$ se mueven de manera muy activa cuando la frecuencia de oscilación coincide con su frecuencia natural: en resonancia. El alimento se cocina por una especie de "fricción cinética" a medida que las moléculas de $H_2O$ oscilantes (u otras moléculas polares) imparten movimiento térmico a las moléculas de su alrededor. El envase metálico refleja las microondas por todo el horno para una rápida cocción.

El papel seco, los platos de espuma de estireno u otros materiales recomendados para usar en los hornos de microondas no contienen agua ni ninguna otra molécula polar, de modo que las microondas pasan a través de ellos sin ningún efecto. Lo mismo ocurre con el hielo, en el que las moléculas de $H_2O$ están bloqueadas en su posición y no pueden girar. Los materiales metálicos reflejan las microondas, razón por la cual los utensilios metálicos no funcionan bien en un horno de microondas.

Cuando quieras hervir agua en un horno de microondas debes tener cuidado. En ocasiones el agua puede calentarse más rápido de lo que pueden formarse burbujas, y entonces el agua se calienta por encima del punto de ebullición: se supercalienta. Si el agua se sacude o agita lo suficiente como para que se formen burbujas con rapidez, éstas expulsarán violentamente el agua caliente de su contenedor. A más de una persona le ha explotado agua en ebullición en la cara.

[6]La carga de prueba es pequeña, de modo que no influye mucho en las fuentes del campo que se va a medir. Recuerda, de tu estudio del calor, la misma necesidad de un termómetro de masa pequeña cuando mides la temperatura de cuerpos con masas más grandes.

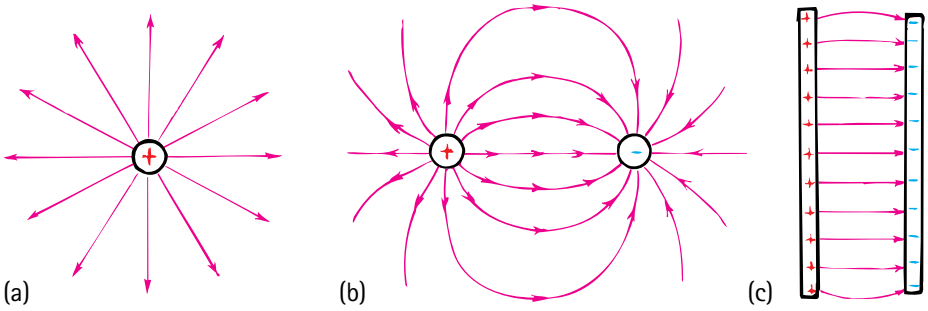



**FIGURA 22.18**
Algunas configuraciones del campo eléctrico. (a) Líneas de fuerza que emanan de una sola partícula con carga positiva. (b) Líneas de fuerza para un par de partículas con igual carga pero opuesta. Observa que las líneas emanan de la partícula positiva y terminan en la partícula negativa. (c) Líneas de fuerza uniformes entre dos placas paralelas con carga opuesta.

Una manera más clara de describir un campo eléctrico es con líneas de fuerza (líneas de campo), como se muestra en la Figura 22.17b. Las líneas de fuerza que se muestran en la figura representan un pequeño número de la cantidad infinitamente grande de posibles líneas que indican la dirección del campo. La figura es una representación bidimensional de tres dimensiones. Donde las líneas están más alejadas, el campo es más débil. Para una carga aislada, las líneas se extienden hasta el infinito; para dos o más cargas opuestas, las líneas se representan como emanaciones que salen de una carga positiva y terminan en la carga negativa. En la Figura 22.18 se muestran algunas configuraciones de campo eléctrico.

El concepto de campo eléctrico ayuda a comprender no sólo las fuerzas entre cuerpos cargados aislados y estacionarios, sino también lo que ocurre cuando se mueven las cargas. Cuando las cargas se mueven, su movimiento se comunica a los cuerpos cargados vecinos en forma de una perturbación del campo. Tal perturbación emana a la velocidad de la luz de un cuerpo cargado y acelerado. Aprenderás que el campo eléctrico es un almacén de energía y que la energía puede transportarse grandes distancias en un campo eléctrico. La energía que viaja en un campo eléctrico puede dirigirse y guiarse mediante alambres metálicos, o puede unirse a un campo magnético para moverse por el espacio vacío. Regresarás a esta idea en el Capítulo 23 y más adelante, cuando aprendas acerca de la radiación electromagnética.

Una barra de dulce en el bolsillo de Percy Spencer se fundió misteriosamente mientras experimentaba con oscilaciones eléctricas en un nuevo tubo de vacío en 1946. Intrigado, colocó algunos granos de maíz cerca del tubo y los vio reventar. El nacimiento del horno de microondas siguió poco después.

## Blindaje eléctrico

Una diferencia importante entre los campos eléctricos y los gravitacionales es que los campos eléctricos pueden blindarse mediante varios materiales, en tanto que los campos gravitacionales no pueden blindarse. La cantidad de blindaje depende del material usado para blindar. Por ejemplo, el aire hace que el campo eléctrico entre dos objetos cargados sea un poco más débil de lo que sería en el vacío, mientras que el aceite colocado entre los objetos puede disminuir el campo hasta casi una centésima parte de su intensidad original. El metal puede blindar por completo un campo eléctrico. Es muy interesante que, cuando no fluye corriente, el campo eléctrico dentro de un metal es cero, sin importar la intensidad del campo exterior.

Considera, por ejemplo, los electrones sobre una bola metálica esférica. Debido a la repulsión mutua, los electrones se dispersarán de manera uniforme sobre la superficie exterior de la bola. No es difícil ver que la fuerza eléctrica ejercida sobre una carga de prueba colocada exactamente en el centro de la bola es cero, porque las fuerzas

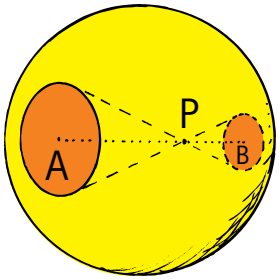



**FIGURA 22.19**
La carga de prueba en P es atraída con la misma intensidad hacia la mayor cantidad de carga en la región más alejada A que hacia la menor cantidad de carga en la región más cercana B. La fuerza neta sobre la carga de prueba es cero, ahí y en cualquier otra parte en el interior del conductor. El campo eléctrico en todo el interior también es cero.

opuestas se equilibran en todas direcciones. Es muy interesante que la cancelación completa ocurra *en cualquier parte* dentro de una esfera conductora. Para entender por qué esto es así se necesita pensar más y tiene que ver con la ley del inverso al cuadrado y un poco de geometría. Considera la carga de prueba en el punto P de la Figura 22.19. La carga de prueba está al doble de distancia del lado izquierdo de la esfera cargada de lo que está del lado derecho. Si la fuerza eléctrica entre la carga de prueba y las cargas dependiera sólo de la distancia, entonces la carga de prueba sería atraída sólo 1/4 parte hacia la izquierda de lo que es atraída hacia la derecha. (Recuerda la ley del inverso al cuadrado: doble de distancia significa sólo 1/4 parte del efecto, tres veces la distancia significa sólo 1/9 parte del efecto, y así sucesivamente.) Pero la fuerza también depende de la cantidad de carga. En la figura, los conos que se extienden del punto P a las áreas A y B tienen el mismo ángulo en el ápice, pero uno tiene el doble de altitud que el otro. Esto significa que el área A en la base del cono más largo es 4 veces el área B en la base del cono más corto, lo que es cierto para cualquier ángulo en el ápice. Dado que 1/4 parte de 4 es igual a 1, una carga de prueba en P es atraída igualmente hacia cada lado. Ocurre una cancelación. Un argumento similar se aplica si los conos que emanan del punto P están orientados en cualquier dirección. La cancelación completa ocurre en todos los puntos dentro de la esfera. (Recuerda este argumento del Capítulo 9, Figura 9.25, para la cancelación de la gravedad dentro de un planeta hueco. La bola metálica se comporta de la misma forma, sea hueca o no, porque toda su carga se reúne sobre su superficie exterior.)

Si el conductor no es esférico, entonces la distribución de carga no será uniforme. En la Figura 22.20 se muestra la distribución de carga sobre conductores con formas diversas. La mayor parte de la carga sobre un cubo conductor, por ejemplo, se repele mutuamente hacia las esquinas. Lo extraordinario aquí es esto: la distribución de carga exacta sobre la superficie de un conductor es tal que el campo eléctrico en todo el interior del conductor es cero. Míralo de esta forma: si hubiera un campo eléctrico dentro de un conductor, entonces los electrones libres en el interior del conductor se pondrían en movimiento. ¿Qué tan lejos se moverían? Hasta que se establezca el equilibrio, que es, por decir, cuando las posiciones de todos los electrones producen un campo cero dentro del conductor.

**FIGURA 22.21**
Los electrones provenientes del relámpago se repelen entre sí hacia la superficie metálica exterior. Aunque el campo eléctrico que establecen los electrones puede ser muy grande *afuera* del automóvil, el campo eléctrico neto *adentro* del automóvil es cero.

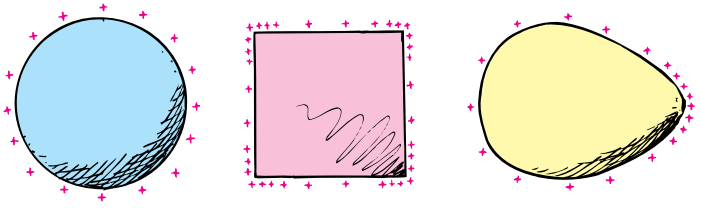


**FIGURA 22.20**
La carga eléctrica se distribuye sobre la superficie de todos los conductores de tal forma que el campo eléctrico en el interior de los conductores es cero.

No es posible blindarse uno mismo de la gravedad, porque la gravedad sólo atrae. No hay partes repelentes de gravedad para compensar las partes de atracción. Sin embargo, el blindaje de los campos eléctricos es muy simple. Rodéate a ti, o a cualquier cosa que quieras blindar, con una superficie conductora. Pon esta superficie en un campo eléctrico de cualquier intensidad de campo. Las cargas libres en la superficie conductora se ordenarán solas sobre la superficie del conductor de tal forma que todas las aportaciones interiores del campo se cancelarán entre sí. Es por eso que ciertos componentes electrónicos están encerrados en cajas metálicas y determinados cables tienen una cubierta metálica: para blindarlos de la actividad eléctrica exterior.

## 22.9 Potencial eléctrico

Cuando estudiaste la energía en el Capítulo 7, aprendiste que un objeto tiene energía potencial gravitacional debido a su ubicación en un campo gravitacional. De igual modo, un objeto cargado tiene energía potencial (EP) en virtud de su ubicación en un campo eléctrico. Tal como se necesita trabajo para levantar un objeto masivo contra el campo gravitacional de la Tierra, se necesita trabajo para empujar una partícula cargada contra el campo eléctrico de un cuerpo cargado. Este trabajo cambia la energía potencial eléctrica de la partícula cargada.[7] Considera la partícula con la pequeña carga positiva ubicada a cierta distancia de una esfera con carga positiva de la Figura 22.22b. Si acercas la partícula a la esfera, gastarás energía para superar la repulsión eléctrica; esto es: harás trabajo al empujar la partícula cargada contra el campo eléctrico de la esfera. Este trabajo realizado al mover la partícula a su nueva ubicación aumenta su energía. A la energía que la partícula posee en virtud de su ubicación se le llama **energía potencial eléctrica**. Si la partícula se libera, acelera en una dirección que se aleja de la esfera y su energía potencial eléctrica cambia a energía cinética.

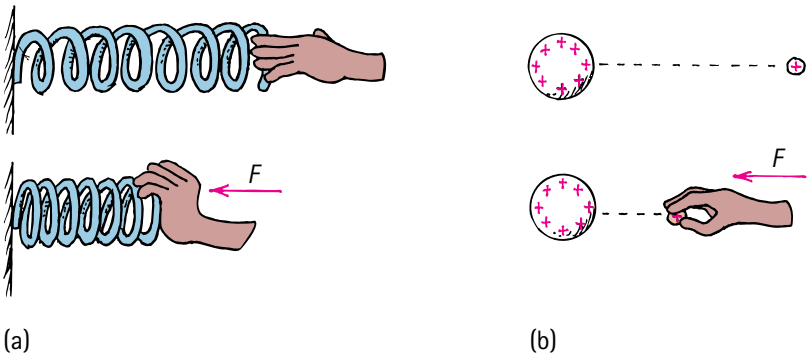



**FIGURA 22.22**
(a) El resorte tiene más EP mecánica cuando se comprime. (b) La partícula cargada igualmente tiene más EP eléctrica cuando se acerca a la esfera cargada. En ambos casos, el aumento de EP es resultado de la entrada de trabajo.

Si en vez de ello empujas una partícula con el doble de carga, haces el doble de trabajo al empujarla, de modo que la partícula con doble carga en la misma ubicación tiene el doble de energía potencial eléctrica que antes. Una partícula con tres veces la carga tiene tres veces más energía potencial, y así sucesivamente. En lugar de lidiar con la energía potencial de una partícula cargada, es conveniente, cuando se trabaja con partículas cargadas en un campo eléctrico, considerar la energía potencial eléctrica *por unidad de carga*. La unidad de carga eléctrica es el coulomb, de modo que la energía potencial eléctrica se considera *por cada coulomb* de carga. Entonces, en cualquier ubicación, la energía potencial eléctrica por coulomb será la misma, sin importar cuánta carga haya. Por ejemplo, un objeto con 10 coulombs de carga en una ubicación específica tiene 10 veces tanta energía potencial eléctrica como un objeto con 1 coulomb de carga.

**VIDEO: Potencial eléctrico**

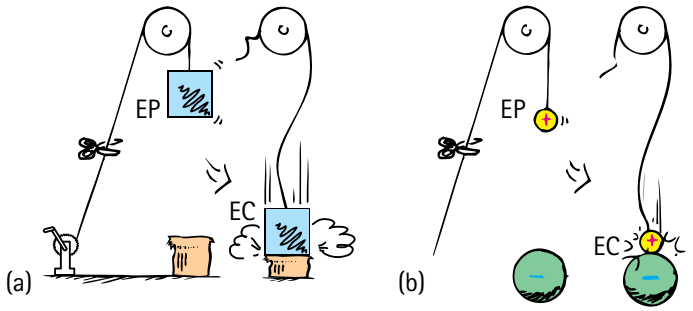



**FIGURA 22.23**
(a) La EP (energía potencial gravitacional) de una masa sostenida en un campo gravitacional, cuando se libera, se transforma en EC (energía cinética). (b) La EP de una partícula cargada sostenida en un campo eléctrico, cuando se libera, se convierte en EC. ¿Puedes ver que la EC adquirida por cada una es igual a la disminución en EP?

[7]Este trabajo es positivo si aumenta la energía potencial eléctrica de la partícula cargada, y negativo si la reduce.

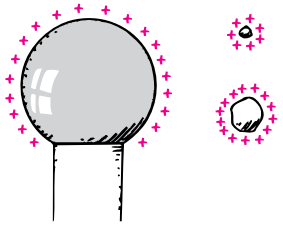


**FIGURA 22.24**
De los dos cuerpos cargados cerca del domo cargado, el que tiene mayor carga posee la mayor EP eléctrica en el campo del domo. Pero el *potencial eléctrico* de cada uno es igual; lo mismo ocurre para cualquier cantidad de carga en la misma ubicación. ¿Puedes ver por qué?

**SCREENCAST: Potencial eléctrico**

De modo que *potencial eléctrico* y *voltaje* significan la misma cosa (energía potencial eléctrica por unidad de carga) en unidades de volts.

Pero 10 veces la energía potencial eléctrica para 10 veces la carga produce el mismo valor de energía potencial eléctrica por 1 coulomb de carga. La energía potencial eléctrica por unidad de carga tiene un nombre especial, **potencial eléctrico**:

$$\text{Potencial eléctrico} = \frac{\text{energía potencial eléctrica}}{\text{carga}}$$

La unidad de medición para el potencial eléctrico es el volt, de modo que el potencial eléctrico con frecuencia se llama *voltaje*. Un potencial de 1 volt (V) es igual a 1 joule (J) de energía por 1 coulomb (C) de carga:

$$1 \text{ volt} = 1\frac{\text{joule}}{\text{coulomb}}$$

Por tanto, una batería de 1.5 volts produce 1.5 joules de energía por cada coulomb de carga que pasa por la batería. Ambos nombres, *potencial eléctrico* y *voltaje*, son comunes, de modo que puedes usar cualquiera. En este libro los nombres se usarán de manera indistinta.

El potencial eléctrico (voltaje) tiene la misma función para la carga que la presión tiene para los fluidos. Cuando existe una diferencia de presión entre dos extremos de una tubería llena con fluido, el fluido fluye del extremo de presión alta al extremo de presión más baja. En el Capítulo 23 verás que las cargas responden a las diferencias de potencial en forma similar.

Si frotas un globo en tu cabello, el globo se carga negativamente, ¡quizás varios miles de volts! Eso sería varios miles de joules de energía, si la carga fuera de 1 coulomb. Sin embargo, 1 coulomb es una cantidad de carga muy grande. La carga en un globo frotado en cabello suele ser mucho menor que un millonésimo de coulomb. Por tanto, la cantidad de energía asociada al globo cargado es muy, muy pequeña. Un voltaje alto significa mucha energía sólo si hay mucha carga de por medio. Hay una diferencia importante entre energía potencial eléctrica y potencial eléctrico.

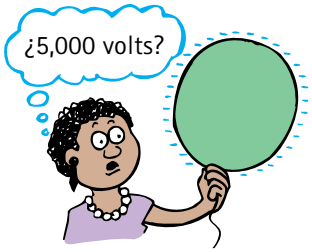



**FIGURA 22.25**
Aunque el potencial eléctrico (voltaje) del globo cargado es alto, la energía potencial eléctrica es baja debido a la pequeña cantidad de carga. Por tanto, cuando el globo se descarga, se transfiere muy poca energía.

Un alto voltaje a baja energía es similar a las inofensivas chispas de alta temperatura de una bengala de fuegos artificiales. Recuerda que la temperatura es la energía cinética promedio por molécula, lo cual significa que la energía total es grande sólo para un número grande de moléculas. De igual modo, alto voltaje significa una gran cantidad de energía sólo para una gran cantidad de carga.

**PUNTO DE CONTROL**

**Si en la carga de prueba cerca de la esfera cargada de la Figura 22.22b hubiera el doble de coulombs, ¿cómo se afectaría la energía potencial eléctrica de la carga de prueba en relación con la esfera? ¿Cómo se afectaría su potencial eléctrico?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

El doble de coulombs significa que la carga de prueba tiene el doble de energía potencial eléctrica (porque el doble de trabajo puso a la carga en dicha ubicación). Pero el potencial eléctrico no se modificaría. El potencial eléctrico (medido en volts) es diferente de la energía potencial eléctrica (medida en joules). Asegúrate de comprender esto antes de estudiar más.

## Almacenamiento de energía eléctrica

La energía eléctrica puede almacenarse en un dispositivo común denominado **capacitor**. El capacitor más simple es un par de placas conductoras separadas por una pequeña distancia, pero que no se tocan. Cuando las placas se conectan a un dispositivo de carga, como la batería que se muestra en la Figura 22.26, los electrones se transfieren de una placa a la otra. Esto ocurre a medida que la terminal positiva de la batería jala electrones de la placa conectada a ella. Dichos electrones, en efecto, son bombeados a través de la batería y por medio de la terminal negativa hacia la placa opuesta. Las placas del capacitor tienen entonces cargas iguales y opuestas: la placa positiva conectada a la terminal positiva de la batería y la placa negativa conectada a la terminal negativa. El proceso de carga se completa cuando la diferencia de potencial entre las placas es igual a la diferencia de potencial entre las terminales de la batería: el voltaje de la batería. Cuanto mayor sea el voltaje de la batería, y más grandes y juntas las placas, mayor será la carga que pueda almacenarse. En la práctica, las placas pueden ser delgadas hojas metálicas separadas por una delgada hoja de papel. Este "emparedado de papel" se enrolla entonces para ahorrar espacio y se inserta en un cilindro. Tal capacitor práctico, junto con otros, se muestra en la Figura 22.28.

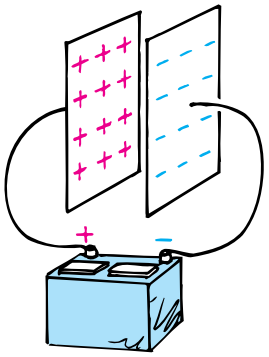


**FIGURA 22.26**
Un capacitor que consiste en dos placas metálicas paralelas con espacios muy estrechos entre sí. Cuando se conectan a una batería, las placas adquieren cargas iguales y opuestas. Entonces el voltaje entre las placas coincide con la diferencia de potencial eléctrico entre las terminales de la batería.

**FIGURA 22.27**
Mona El Tawil-Nassar ajusta las placas de un capacitor didáctico.

Los capacitores se encuentran en casi todos los circuitos electrónicos. Un capacitor almacena energía en unidades de flash fotográfico comunes. La rápida liberación de esta energía es evidente en la corta duración del destello. Lo mismo ocurre con un desfibrilador, donde cortas explosiones de energía se aplican a una víctima de ataque cardiaco. De igual modo, pero a una escala más grande, enormes cantidades de energía se almacenan en bancos de capacitores que impulsan láseres gigantes en los laboratorios nacionales.

La energía almacenada en un capacitor proviene del trabajo necesario para cargarlo. Descargar un capacitor cargado puede ser una experiencia peligrosa si sucede que tú eres la ruta conductora. La transferencia de energía que ocurre puede ser mortal donde hay presentes altos voltajes, como en la fuente de poder de un televisor, incluso después de que el aparato se apague. Ésta es la principal razón de las señales de advertencia en tales dispositivos. La energía se almacena en el campo eléctrico entre sus placas. Entre las placas paralelas, el campo eléctrico es uniforme, como se indica en la Figura 22.18c. De modo que la energía almacenada en un capacitor es la energía de su campo eléctrico. En el Capítulo 23 se hablará de la importancia de los capacitores en los circuitos eléctricos. Luego, en los Capítulos 25 y 26, verás cómo la energía proveniente del Sol se radia en forma de campos eléctricos y magnéticos. El hecho de que la energía esté contenida en los campos eléctricos es verdaderamente trascendental.

**FIGURA 22.28**
Capacitores prácticos.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Cuál es la carga neta de un capacitor cargado?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Cero, porque las cargas en sus dos placas son iguales en número y opuestas en signo. Incluso cuando el capacitor se descarga (por decir, al proporcionar una ruta para que la carga fluya entre las placas con carga opuesta) la carga neta del capacitor sigue siendo cero, porque entonces cada placa tiene carga cero.

**FIGURA 22.29**
Lillian, con la mano sobre un generador Van de Graaff cargado, está cargada a un voltaje alto, como lo demuestra la repulsión electrostática de su cabello.

## Generador Van de Graaff

Un dispositivo de laboratorio común para producir altos voltajes y crear electricidad estática es el *generador Van de Graaff*, inventado por el físico estadounidense Robert J. van de Graaff en 1931 para suministrar el alto voltaje necesario para los primeros aceleradores de partículas. Estos aceleradores eran conocidos como aplastadores de átomos, porque aceleraban partículas subatómicas a rapideces muy altas y luego las "aplastaban" contra los átomos blanco. Las colisiones resultantes podían desprender protones y neutrones de los núcleos atómicos y crear radiación de alta energía como los rayos X y los rayos gamma. La capacidad para crear estas colisiones de alta energía es esencial para la física de partículas y nuclear.

Los generadores Van de Graaff también son las máquinas de relámpagos que los científicos locos usaban en las antiguas películas de ciencia ficción. Un modelo pedagógico de un generador Van de Graaff suministra la carga estática para hacer que el cabello de Lillian se erice en la Figura 22.29.

La Figura 22.30 muestra el interior de un modelo simple del generador. Una esfera metálica hueca está sostenida por un pedestal aislante cilíndrico. Un cinturón de caucho impulsado por un motor dentro del pedestal de soporte pasa por un conjunto de puntas metálicas con forma de peine que se mantienen a un gran potencial negativo en relación con la tierra. La descarga en las puntas deposita un suministro continuo de electrones en el cinturón, que después se llevan hacia la esfera conductora hueca. Dado que el campo eléctrico dentro de la esfera es cero, la carga no tiene impedimento para escapar hacia las puntas metálicas (pequeños pararrayos) dentro de la esfera. Los electrones se repelen entre sí hacia la superficie exterior de la esfera, tal como la carga estática siempre se encuentra en la superficie exterior de cualquier conductor. Esto deja el interior descargado y en condiciones de recibir más electrones conforme éstos se transportan en el cinturón. El proceso es continuo y la carga se acumula hasta que el potencial negativo sobre la esfera es mucho mayor que en la fuente de voltaje en el fondo, del orden de millones de volts.

**VIDEO: El generador Van de Graaff**

La mayor amenaza para la civilización es el exceso de certeza.

Una esfera con un radio de 1 m puede elevarse a un potencial de 3 millones V antes de que ocurra una descarga eléctrica a través del aire. El voltaje puede aumentarse aún más si se aumenta el radio de la esfera o si se coloca todo el sistema en un contenedor lleno con gas a alta presión. Los generadores Van de Graaff pueden producir voltajes de hasta 20 millones de V. Tocar uno puede ser una experiencia que ponga los pelos de punta.

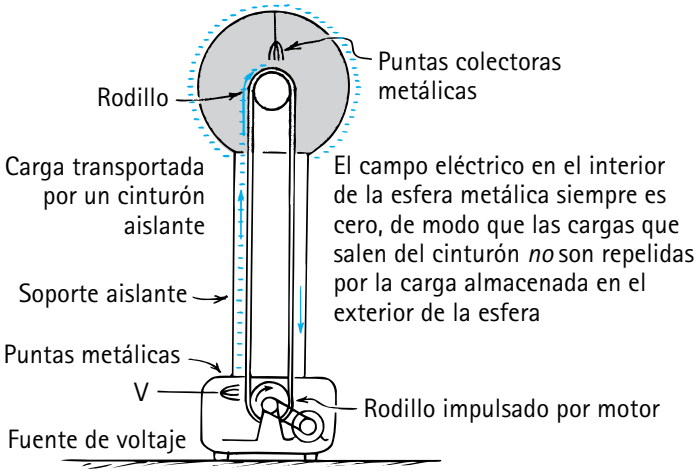



**FIGURA 22.30**
Un modelo simple de un generador Van de Graaff.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Electricidad.** Término general para los fenómenos eléctricos, muy parecido a lo que la *gravedad* tiene que ver con los fenómenos gravitacionales, o la *sociología* con los fenómenos sociales.

**Electrostática.** Estudio de la carga eléctrica en reposo (no en *movimiento*, como en las corrientes eléctricas).

**Conservación de la carga.** La carga eléctrica no se crea ni se destruye. La carga total antes de una interacción es igual a la carga total después.

**Ley de Coulomb.** La relación entre la fuerza eléctrica, la carga y la distancia:

$$F = k\frac{q_1 q_2}{d^2}$$

Si las cargas son de signos iguales, la fuerza es de repulsión; si las cargas son distintas, la fuerza es de atracción.

**Coulomb.** La unidad del SI de carga eléctrica. Un coulomb (símbolo C) es igual a la carga total de $6.25 \times 10^{18}$ electrones.

**Conductor.** Cualquier material que tiene partículas cargadas libres que fluyen con facilidad por él cuando una fuerza eléctrica actúa sobre ellas.

**Aislante.** Un material que no contiene partículas cargadas libres y por el cual las cargas no fluyen con facilidad.

**Semiconductor.** Material con propiedades que están entre las de un conductor y las de un aislante, y cuya resistencia puede modificarse si se agregan impurezas.

**Superconductor.** Material que es un conductor perfecto, con resistencia cero al flujo de carga eléctrica.

**Carga por contacto.** Transferencia de carga eléctrica entre objetos mediante frotamiento o simple contacto.

**Carga por inducción.** Redistribución de cargas eléctricas en los objetos causada por la influencia eléctrica de un objeto cargado cercano mas no en contacto.

**Eléctricamente polarizado.** Término aplicado a un átomo o molécula en el que las cargas están alineadas de modo que un lado tiene un ligero exceso de carga positiva y el otro lado, un ligero exceso de carga negativa.

**Campo eléctrico.** Fuerza eléctrica por unidad de carga. El campo se puede considerar como un "aura" que rodea a los objetos cargados y es un almacén de energía eléctrica. En torno a un punto cargado, el campo disminuye con la distancia de acuerdo con la ley del inverso al cuadrado, como un campo gravitacional. Entre placas paralelas con cargas opuestas, el campo eléctrico es uniforme:

$$\text{Campo eléctrico} = \frac{F}{q}$$

**Energía potencial eléctrica.** Energía que posee un objeto cargado en virtud de su ubicación en un campo eléctrico.

**Potencial eléctrico.** La energía potencial eléctrica por unidad de carga, medida en volts; con frecuencia llamada *voltaje*:

$$\text{Voltaje} = \frac{\text{energía potencial eléctrica}}{\text{carga}}$$

**Capacitor.** Dispositivo eléctrico (en su forma más simple, un par de placas conductoras paralelas separadas por una pequeña distancia) que almacena carga eléctrica y energía.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 22.1 Electricidad

1. ¿Qué término se usa para la "electricidad en reposo"?
2. ¿Por qué la fuerza gravitacional entre la Tierra y la Luna predomina sobre las fuerzas eléctricas?

### 22.2 Cargas eléctricas

3. ¿Qué parte de un átomo tiene carga positiva y qué parte tiene carga negativa?
4. ¿Cómo se compara la carga de un electrón con la carga de otro electrón? ¿Cómo se compara con la carga de un protón?
5. Por lo general, ¿cuál es la carga neta de un átomo?

### 22.3 Conservación de carga

6. ¿Qué es un ión positivo? ¿Un ión negativo?
7. ¿Qué se entiende por conservación de la carga?
8. ¿Qué se entiende al decir que la carga está *cuantizada*?
9. Menciona una partícula que tenga exactamente un cuanto de unidad de carga.

### 22.4 Ley de Coulomb

10. ¿Cómo se compara un *coulomb* de carga con la carga de un *solo* electrón?
11. ¿En qué se parece la ley de Coulomb a la ley de gravitación de Newton? ¿En qué son diferentes?

### 22.5 Conductores y aislantes

12. ¿Por qué los metales son buenos conductores tanto de calor como de electricidad?
13. ¿Por qué los materiales como el vidrio y el caucho son buenos aislantes?
14. ¿Cómo difiere un semiconductor de un conductor o de un aislante?
15. ¿De qué está compuesto un transistor y cuáles son algunas de sus funciones?
16. ¿Cómo difiere el flujo de corriente en un superconductor, comparado con el flujo en conductores ordinarios?

### 22.6 Carga

17. ¿Qué ocurre con los electrones en cualquier proceso de carga?

18. ¿Qué tipo de carga ocurre cuando te deslizas sobre una superficie plástica?
19. ¿Qué tipo de carga ocurre durante las tormentas eléctricas?
20. ¿Cuál es el principal propósito de un pararrayos?

### 22.7 Polarización de la carga

21. En términos de carga neta, ¿cómo difiere un objeto eléctricamente *polarizado* de un objeto eléctricamente *cargado*?
22. ¿Qué es un dipolo eléctrico?
23. Ofrece un ejemplo de un dipolo eléctrico común.

### 22.8 Campo eléctrico

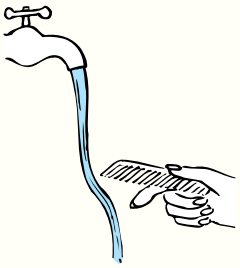
24. Ofrece dos ejemplos de campos de fuerza comunes.
25. ¿Cómo se define la dirección de un campo eléctrico?
26. ¿Por qué en el centro de un conductor esférico cargado no hay ningún campo eléctrico?
27. Cuando las cargas se repelen entre sí y se distribuyen sobre la superficie de los conductores, ¿qué ocurre con el campo eléctrico en el interior del conductor?

### 22.9 Potencial eléctrico

28. ¿Cuánta energía se suministra a cada coulomb de carga que fluye por una batería de 1.5 V?
29. Un globo puede cargarse con facilidad a varios miles de volts. ¿Esto significa que tiene varios miles de joules de energía? Explica.
30. ¿Dónde se almacena la energía en un capacitor?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

31. Demuestra la carga por fricción y la descarga por medio de puntas con un amigo que esté de pie en el otro extremo de una habitación alfombrada. Avancen uno hacia el otro arrastrando los pies sobre la alfombra, hasta que se toquen la nariz. Ésta puede ser una experiencia deliciosamente hormigueante, dependiendo de cuán seco esté el aire y cuán puntiaguda tengan la nariz.
32. Escribe una carta al abuelo y cuéntale por qué está a salvo en una tormenta eléctrica si se queda dentro de un automóvil.
33. Frota enérgicamente un peine a través de tu cabello o sobre una prenda de lana y acércalo a un chorro de agua, pequeño pero continuo. ¿El chorro de agua se desvía?



## SUSTITUYE Y LISTO (FAMILIARIZACIÓN CON ECUACIONES)

$$\textit{Ley de Coulomb: } F = k\frac{q_1 q_2}{d^2}$$

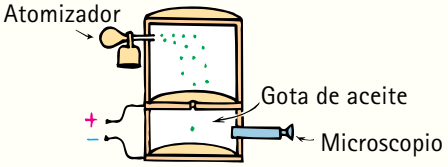
34. Dos cargas puntuales, cada una con 0.1 C de carga, están separadas 0.1 m. Dado que $k = 9 \times 10^9$ N·m$^2$/C$^2$ (la constante de proporcionalidad para la ley de Coulomb), demuestra que la fuerza entre las cargas es $9 \times 10^9$ N.
35. Resuelve la fuerza en el problema anterior, cuando las cargas están separadas el doble de distancia.

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

36. Dos cargas puntuales están separadas 6 cm. La fuerza de atracción entre ellas es de 20 N. Encuentra la fuerza entre ellas cuando están separadas 12 cm. (¿Por qué puedes resolver este problema sin conocer las magnitudes de las cargas?)
37. Supón que las cargas que se atraen entre sí en el problema anterior tienen la misma magnitud. Reordena la ley de Coulomb y demuestra que la magnitud de cada carga es $2.8 \times 10^{-6}$ C (2.8 microcoulombs).
38. Dos bolitas, cada una con una carga de 1 microcoulomb ($10^{-6}$ C), están separadas 3 cm (0.03 m). Demuestra que la fuerza eléctrica entre ellas es de 10 N. ¿Cuál sería la masa de un objeto que experimenta esta misma fuerza en el campo gravitacional de la Tierra?
39. Los que se dedican a la electrónica desprecian la fuerza de gravedad sobre los electrones. Para ver por qué, calcula la fuerza de la gravedad de la Tierra sobre un electrón y compárala con la fuerza ejercida sobre el electrón por un campo eléctrico de magnitud 10,000 V/m (un campo relativamente pequeño). La masa y la carga de un electrón se proporcionan en los forros de este libro.
40. Los físicos atómicos ignoran el efecto de la gravedad dentro de un átomo. Para ver por qué, calcula y compara las fuerzas gravitacional y eléctrica entre un electrón y un protón separados $10^{-10}$ m. Las cargas y masas se proporcionan en los forros de este libro.
41. Una gota de tinta en una impresora industrial de inyección de tinta porta una carga de $1.6 \times 10^{-10}$ C y se desvía sobre papel por una fuerza de $3.2 \times 10^{-4}$ N. Demuestra que la intensidad del campo eléctrico para producir esta fuerza es de 2 millones N/C.
42. La diferencia de potencial entre una nube de tormenta y el suelo es de 100 millones V. Si una carga de 2 C destella en un rayo de la nube a la Tierra, ¿cuál es el cambio de energía potencial de la carga?
43. Una energía de 0.1 J se almacena en la esfera metálica en la parte superior de un generador Van de Graaff. Una chispa que porta 1 microcoulomb ($10^{-6}$ C) descarga la esfera. Demuestra que el potencial de la esfera en relación con tierra es 100,000 V.

44. Encuentra el cambio de voltaje cuando (a) un campo eléctrico realiza 12 J de trabajo sobre una carga de 0.0001 C; y (b) el mismo campo eléctrico realiza 24 J de trabajo sobre una carga de 0.0002 C.

45. En 1909, Robert Millikan fue el primero en encontrar la carga de un electrón en su ahora famoso experimento de la gota de aceite. En dicho experimento, pequeñas gotas de aceite se rociaron en un campo eléctrico uniforme entre un par de placas horizontales con cargas opuestas. Las gotas se observaron con un ocular amplificador y el campo eléctrico se ajustó de modo que la fuerza ascendente sobre algunas gotas de aceite con carga negativa fuera apenas suficiente para equilibrar la fuerza descendente de la gravedad; esto es: cuando estaban suspendidas, la fuerza ascendente $qE$ igualaba a $mg$. Millikan midió con exactitud las cargas en muchas gotas de aceite y descubrió que los valores eran múltiplos enteros de $1.6 \times 10^{-19}$ C: la carga del electrón. Por esto ganó el Premio Nobel.

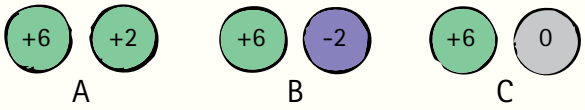



a. Si una gota de $1.1 \times 10^{-14}$ kg de masa permanece estacionaria en un campo eléctrico de $1.68 \times 10^{5}$ N/C, ¿cuál es la carga de esta gota?

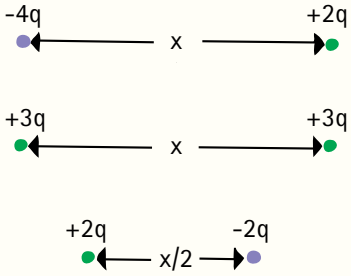
b. ¿Cuántos electrones más hay en esta gota de aceite particular (dada la carga actualmente conocida del electrón)?

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

46. Los tres pares de esferas metálicas del mismo tamaño tienen diferentes cargas sobre sus superficies, como se indica. Cada par se junta, se le permite tocarse y luego se separa. Clasifica, de mayor a menor, la cantidad total de carga sobre los pares de esferas después de la separación.




47. A continuación se muestran tres pares distintos de cargas puntuales. Supón que los pares interactúan sólo uno con el otro. Clasifica las magnitudes de las fuerzas entre los pares, de mayor a menor.




## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

48. A nivel atómico, ¿qué se entiende cuando se dice que algo está cargado eléctricamente?

49. ¿Por qué la carga generalmente se transfiere mediante electrones en lugar de mediante protones?

50. ¿Por qué los objetos con gran número de electrones usualmente no están cargados eléctricamente?

51. ¿Por qué con frecuencia las prendas se adhieren después de dar vueltas en una secadora de ropa?

52. ¿Por qué el polvo se atrae hacia un DVD frotado con un paño seco?

53. Cuando te peinas, arrastras electrones de tu cabello al peine. ¿Entonces tu cabello se carga positiva o negativamente? ¿Y qué hay del peine?

54. En algunas casetas de peaje, un delgado alambre metálico sobresale de la carretera y hace contacto con los automóviles antes de que lleguen al recolector de peaje. ¿Cuál es el propósito de este alambre?

55. ¿Por qué los neumáticos de los camiones que transportan gasolina y otros fluidos inflamables se fabrican para ser conductores eléctricos?

56. Un electroscopio es un dispositivo simple que consiste en una bola metálica que está unida mediante un conductor a dos delgadas hojas de metal protegidas de perturbaciones del aire en un frasco, como se muestra en el dibujo. Cuando la bola se toca con un cuerpo cargado, las hojas que normalmente cuelgan rectas hacia abajo se separan. ¿Por qué?

(Los electroscopios son útiles no sólo como detectores de carga, sino también para medir la cantidad de carga: cuanto más carga se transfiere a la bola, más se separan las hojas.)

57. Las hojas de un electroscopio cargado colapsan con el tiempo. A mayores altitudes, colapsan con más rapidez. ¿Por qué sucede esto? (*Sugerencia*: la existencia de rayos cósmicos se indicó por primera vez mediante esta observación.)

58. ¿Es necesario que un cuerpo cargado toque en realidad la bola del electroscopio para que las hojas se separen? Defiende tu respuesta.

59. Un cristal de sal consiste en iones negativos y positivos. ¿Cómo se compara la carga neta de los iones negativos con la de los iones positivos? Explica.

60. ¿Cómo puedes cargar un objeto negativamente sólo con la ayuda de un objeto con carga positiva?

61. Cuando un material se frota contra otro, los electrones saltan con facilidad de uno al otro pero los protones no. ¿Por qué? (Piensa en términos atómicos.)

62. ¿Qué te dice la ley del inverso al cuadrado acerca de la relación entre fuerza y distancia?

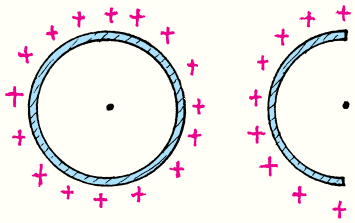
63. Los 5,000 trillones ($5 \times 10^{22}$) de electrones que se mueven libremente en una moneda se repelen entre sí. ¿Por qué no salen disparados de la moneda?

64. ¿Cómo cambia la magnitud de la fuerza eléctrica entre un par de partículas cargadas cuando las partículas se mueven para estar a la mitad de la separación? ¿A un tercio de la separación?

65. ¿Cómo se compara la magnitud de la fuerza eléctrica entre un par de partículas cargadas cuando se llevan a la mitad de su distancia de separación original? ¿A un cuarto de su distancia original? ¿A cuatro veces su distancia original? (¿Qué ley guía tus respuestas?)
66. Cuando duplicas la distancia entre un par de partículas cargadas, ¿qué ocurre con la fuerza entre ellas? ¿Ello depende del signo de las cargas? ¿Qué ley defiende tu respuesta?
67. Cuando duplicas la carga en sólo una de un par de partículas, ¿qué efecto tiene esto sobre la fuerza entre ellas? ¿El efecto depende del signo de la carga?
68. Cuando duplicas la carga en ambas partículas en un par, ¿qué efecto tiene esto sobre la fuerza entre ellas? ¿Depende del signo de la carga?
69. La constante de proporcionalidad $k$ en la ley de Coulomb es enorme en unidades ordinarias, en tanto que la constante de proporcionalidad $G$ en la ley de gravitación de Newton es pequeña. ¿Qué indica esto acerca de las intensidades relativas de estas dos fuerzas?
70. ¿Cómo es que las líneas de campo eléctrico indican la intensidad de un campo eléctrico?
71. ¿Cómo se indica la dirección de un campo eléctrico con las líneas de campo eléctrico?
72. Supón que la intensidad del campo eléctrico alrededor de una carga puntual aislada tiene cierto valor a una distancia de 1 m. ¿Cómo se comparará la intensidad del campo eléctrico a una distancia de 2 m de la carga puntual? ¿Qué ley guía tu respuesta?
73. En el fenómeno de la superconductividad, ¿qué ocurre con la resistencia eléctrica a bajas temperaturas?
74. Las mediciones demuestran que existe un campo eléctrico que rodea la Tierra. Su magnitud es de cerca de 100 N/C en la superficie de la Tierra y apunta hacia adentro, hacia el centro de la Tierra. A partir de esta información, ¿puedes establecer si la Tierra está cargada negativa o positivamente?
75. ¿Por qué los pararrayos suelen estar a una mayor elevación que los edificios que protegen?
76. ¿Por qué los zapatos con clavos metálicos no son una buena idea para los golfistas en un día de tormenta?
77. Si se aplica un campo eléctrico suficientemente grande, incluso un aislante conducirá una corriente eléctrica, como lo demuestran los rayos que atraviesan el aire. Explica cómo ocurre esto y ten en cuenta las cargas opuestas en un átomo y cómo sucede la ionización.
78. Si frotas un globo inflado contra tu cabello y lo colocas contra una puerta, ¿qué mecanismo hace que se pegue? Explica.
79. Cuando un automóvil se mueve dentro de una cámara de pintura, una vaporización de pintura se rocía alrededor de su cuerpo. Cuando al cuerpo se le aplica una súbita carga eléctrica y la vaporización se atrae hacia él, listo: el automóvil se pinta rápida y uniformemente. ¿Qué tiene que ver con esto el fenómeno de la polarización?
80. ¿Cómo es que un átomo cargado (un ión) puede atraer a un átomo neutro?
81. Si colocas un electrón libre y un protón libre en el mismo campo eléctrico, ¿cómo se compararán las fuerzas que actúan sobre ellos?
82. ¿Cómo se compararán las aceleraciones del protón y el electrón en el problema anterior?
83. ¿Cómo se compararán las direcciones del viaje para el electrón y el protón en el problema anterior?
84. ¿Por qué la magnitud del campo eléctrico es cero a medio camino entre dos cargas puntuales idénticas?
85. Imagina un protón en reposo a cierta distancia desde una placa con carga negativa. Éste se suelta y choca con la placa. Luego imagina el caso similar de un electrón en reposo a la misma distancia de una placa con carga similar pero positiva. ¿En cuál caso la partícula en movimiento tendrá mayor rapidez cuando ocurra la colisión? ¿Por qué?
86. Un vector de campo gravitacional apunta hacia la Tierra; un vector de campo eléctrico apunta hacia un electrón. ¿Por qué los vectores de campo eléctrico apuntan al lado contrario de los protones?
87. Cuando un campo eléctrico se aplica a un recipiente poco profundo con aceite vegetal, ¿por qué los pequeños trozos de hilo que flotan en el aceite se alinean con el campo como brújulas en un campo magnético?
88. Supón que un archivero metálico está cargado. ¿Cómo se compara la concentración de carga en las esquinas del archivero con la concentración de carga en las partes planas del archivero?
89. Si utilizas 10 J de trabajo para empujar una carga de 1 C contra un campo eléctrico, ¿cuál sería su cambio de voltaje?
90. Cuando se libera, ¿cuál es la energía cinética de la carga de 1 C del problema anterior, si pasa volando por su posición de partida?
91. ¿Cuál es el voltaje en la posición de una carga de 0.0001 C que tiene una energía potencial eléctrica de 0.5 J (ambas medidas en relación con el mismo punto de referencia)?
92. ¿Por qué es seguro permanecer dentro de un automóvil durante una tormenta eléctrica?
93. ¿Cómo se comparan las cargas sobre las placas opuestas de un capacitor?
94. Con la finalidad de almacenar más energía en un capacitor de placas paralelas cuyas placas difieren por un voltaje fijo, ¿qué cambio harías en las placas?
95. ¿Por qué es peligroso tocar las terminales de un capacitor de alto voltaje incluso después de que el circuito de carga se apaga?
96. Un electrón volt (eV) es una unidad de energía. ¿Qué es más grande: un GeV o un MeV?
97. ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico dentro del domo de un generador Van de Graaff cargado?
98. ¿Sentirías algún efecto eléctrico si estuvieras adentro de la esfera cargada de un generador Van de Graaff? ¿Por qué sí o por qué no?
99. Un amigo dice que la razón por la que el cabello se eriza cuando tocas un generador Van de Graaff cargado es simplemente que los cabellos se cargan y son tan ligeros que la repulsión entre los cabellos es visible. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

100. Cuando sacas tu traje de lana de la bolsa de la tintorería, la bolsa queda con carga positiva. Discute cómo es que ocurre esto.
101. El plástico para envolver alimentos se carga eléctricamente cuando lo sacas de su caja. Como resultado, es atraído hacia objetos como los contenedores de alimentos. ¿El plástico se pega mejor a los contenedores plásticos o a los contenedores metálicos? Discute.
102. Hablando estrictamente, cuando un objeto adquiere una carga positiva por la transferencia de electrones, ¿qué ocurre con su masa? Discute qué ocurre con su masa cuando adquiere una carga negativa. (¡Piensa en pequeño!)
103. Hablando estrictamente, ¿una moneda será un poco más masiva si tiene una carga negativa o una carga positiva? Discute.
104. Es relativamente sencillo desprender los electrones exteriores de un átomo pesado como el del uranio (que entonces se convierte en un ión uranio), pero es muy difícil quitar los electrones interiores. Discute por qué esto es así.
105. Si los electrones fuesen positivos y los protones fuesen negativos, discute si la ley de Coulomb se escribiría de la misma forma o de manera diferente.
106. Si una tormenta eléctrica te sorprende fuera de casa, ¿por qué no debes pararte bajo un árbol? ¿Puedes pensar en una razón por la que no debas pararte con las piernas separadas? ¿O por qué acostarte puede ser peligroso? (*Sugerencia*: considera la diferencia de potencial eléctrico.)
107. Dos piezas de plástico, un anillo completo y un anillo a la mitad, tienen los mismos radios y la misma densidad de carga. ¿Cuál campo eléctrico en el centro tiene mayor magnitud? Discute y defiende tu respuesta.



108. El contacto con una bola metálica cargada no te produce ninguna lesión, aun cuando su voltaje pueda ser muy alto. ¿La razón es similar a la que explica por qué no resultas dañado por las chispas de más de 1,000 °C de una bengala de fuegos artificiales? Discute y defiende tu respuesta en términos de las energías involucradas.

23

CAPÍTULO 23

# Corriente eléctrica


23.1 Flujo de carga y corriente eléctrica

23.2 Fuentes de voltaje

23.3 Resistencia eléctrica

23.4 La ley de Ohm

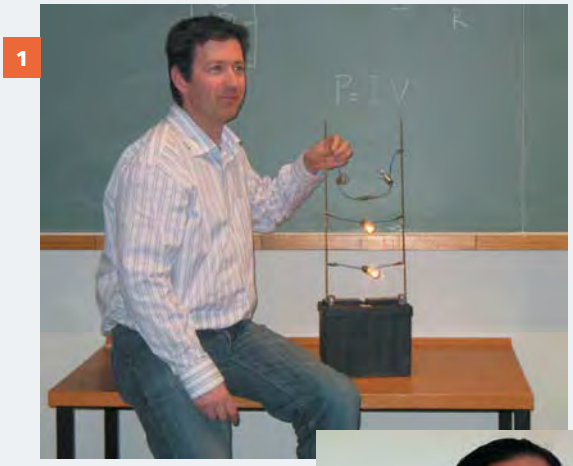
23.5 Corriente directa y corriente alterna

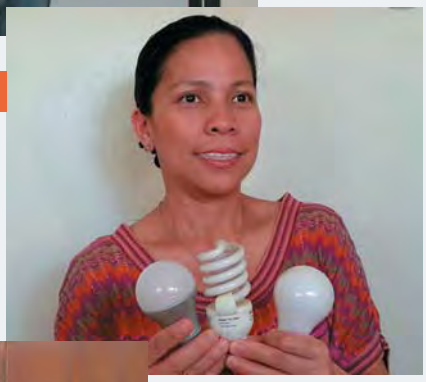
23.6 Rapidez y fuente de los electrones en un circuito

23.7 Potencia eléctrica

23.8 Lámparas

23.9 Circuitos eléctricos



1 Para construir un circuito en paralelo, David Housden sujeta lámparas a terminales alargadas de una batería común de automóvil. Pide a sus alumnos que predigan el brillo relativo de las lámparas idénticas en la rama superior. 2 Juliet Layugan incita una polémica en su clase sobre las eficiencias relativas de las lámparas LED, CFL e incandescente. 3 Will Maynez muestra a su clase de laboratorio cómo conectar baterías en serie y luego en paralelo, y predecir los efectos sobre la iluminación de las lámparas. 4 La fuente de poder que Jill Johnsen muestra a sus estudiantes de laboratorio suministra 2.1 volts a través de un par de resistores en serie.

La corriente eléctrica es el flujo de carga, presionada a moverse por el voltaje y amortiguada por la resistencia. La relación matemática entre las tres cantidades de corriente, voltaje y resistencia se atribuye al científico alemán Georg Simon Ohm, quien nació en 1789. Su padre fue cerrajero y su madre era hija de un sastre. Ninguno tuvo educación formal. El padre autodidacta de Ohm impartió a sus hijos una excelente enseñanza en casa, y su hermano Martin se convirtió en un conocido matemático.

En 1805, a los 15 años de edad, Ohm ingresó a la Universidad de Erlangen. Pero, en lugar de concentrarse en sus estudios, pasaba mucho tiempo bailando, patinando en hielo y jugando billar. El padre de Ohm, enojado porque Georg estaba desperdiciando su oportunidad educativa, lo envió a Suiza, donde, en septiembre de 1806, a los escasos 16 años de edad, se convirtió en profesor de matemáticas. Dejó su puesto de profesor $2^1/_2$ años después y se convirtió en tutor, pero continuó con su pasión por estudiar matemáticas. Sus estudios rindieron frutos. De regreso a la Universidad de Erlangen, Ohm obtuvo su doctorado en 1811 y se unió al personal docente de dicha universidad como profesor de matemáticas. Pero las clases se pagaban tan mal que pronto las abandonó y pasó los siguientes 6 años enseñando en escuelas mediocres de Bavaria. Durante esta época escribió un libro elemental de geometría. El libro impresionó al rey Guillermo III de Prusia, quien ofreció a Ohm una posición de profesor en Colonia. Por fortuna, el laboratorio de física de la escuela estaba bien equipado, de modo que Ohm se dedicó a la experimentación en física. Su experiencia práctica con las actividades de cerrajería de su padre le resultó útil.

Ohm escribió mucho. Sin embargo, la ley de Ohm no se apreció por completo en su época. Finalmente su obra fue reconocida en 1841 por la Royal Society, que le otorgó la prestigiosa medalla Copley. Ohm llegó a ser profesor de física experimental en la Universidad de Munich, donde permaneció hasta su muerte a los 65 años de edad.

La unidad del SI de resistencia eléctrica, el ohm (símbolo Ω), recibe su nombre en honor a él.

## 23.1 Flujo de carga y corriente eléctrica

A partir del estudio del calor y la temperatura, se sabe que, cuando los extremos de un material conductor están a diferente temperatura, la energía térmica fluye de la temperatura más alta a la temperatura más baja. El flujo cesa cuando ambos extremos alcanzan la misma temperatura. De igual modo, si los extremos de un conductor eléctrico están a potenciales eléctricos diferentes, cuando hay una **diferencia de potencial**, la carga fluye de un extremo al otro.[1] El flujo de carga persiste en tanto haya una diferencia de potencial. Sin una diferencia de potencial no fluye carga. Conecta un extremo de un alambre a la esfera cargada de un generador Van de Graaff, por ejemplo, y el otro extremo a tierra, y una oleada de carga fluirá por el alambre. Sin embargo, el flujo será breve, porque la esfera alcanzará con rapidez un potencial común con la tierra.

Para lograr un flujo sostenido de carga en un conductor, se debe hacer algún arreglo que permita mantener una diferencia de potencial mientras la carga fluye de un extremo al otro. La situación es semejante a la del agua que fluye de un depósito más alto a uno más bajo (Figura 23.1a). El agua fluirá en una tubería que conecte los depósitos sólo mientras exista una diferencia en los niveles de agua. El flujo de agua en la tubería, al igual que el flujo de carga en el alambre que conecta el generador Van de Graaff al suelo, cesará cuando las presiones de los dos extremos sean iguales (esto es lo que se da a entender cuando se dice que el agua busca su propio nivel). Un flujo continuo es posible si la diferencia en los niveles de agua, y por tanto la diferencia de presiones del agua, se conserva con el uso de una bomba adecuada (Figura 23.1b).

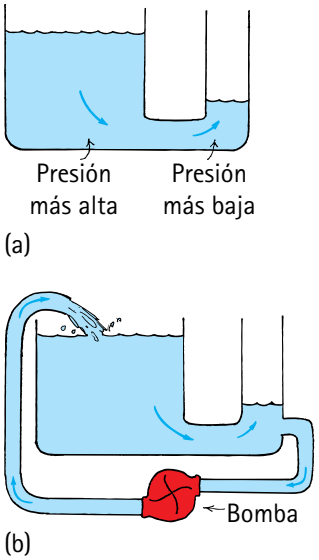



**FIGURA 23.1**
(a) El agua fluye del depósito de presión más alta al depósito de presión más baja. El flujo se detiene cuando cesa la diferencia de presión. (b) El agua sigue fluyendo porque se mantiene una diferencia de presión mediante la bomba.

[1]Cuando se dice que la carga fluye, se entiende que las *partículas* cargadas fluyen. La carga es una propiedad de partículas singulares, más significativamente electrones, protones e iones. Cuando el flujo es de carga negativa, electrones o iones negativos constituyen el flujo. Cuando el flujo de carga es positivo, protones o iones positivos son los que fluyen.

**SCREENCAST: Agua y circuitos de electrones**

Con frecuencia uno piensa que la corriente fluye por un circuito, pero no lo digas cerca de alguien muy quisquilloso con la gramática porque la expresión "la corriente fluye" es redundante. Es más correcto decir "la carga fluye", que es la corriente.

**pti**

- Con frecuencia se menciona a Andre Marie Ampere como "el Newton de la electricidad". En la década de 1820, demostró que alambres paralelos que portaban corriente en la misma dirección se atraían mutuamente, y postuló que la carga en circulación era la que ocasionaba el magnetismo. En su honor, las unidades de corriente son los amperes, con frecuencia acortada a *amps*.

**FIGURA 23.2**
Cada coulomb de carga que fluye en un circuito que conecta los extremos de esta pila de linterna de 1.5 V está energizada con 1.5 J.

**pti**

- Una sola pila de linterna suministra 1.5 V. Dentro de una batería de 9 V hay seis pilas pequeñas de 1.5 V cada una.

**PUNTO DE CONTROL**

**Bien, entonces, una diferencia de potencial a través de los extremos de un alambre produce una corriente. En lugar de decir *diferencia de potencial*, ¿puedes decir también *voltaje*?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Sí. Recuerda del Capítulo 22 que *diferencia de potencial* y *voltaje* son términos que se usan de manera indistinta: la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos en una ruta conductora. Ambos se miden en unidades de volts.

Así como la corriente de agua es el flujo de moléculas de $H_2O$, la **corriente eléctrica** es tan sólo el flujo de carga eléctrica. En los circuitos de alambres metálicos, los electrones constituyen el flujo de carga. Esto es así porque uno o más electrones de cada átomo metálico tienen libertad de moverse a lo largo de la retícula atómica. Estos portadores de carga se llaman *electrones de conducción*. Los protones, por otra parte, no se mueven porque están ligados en el interior de los núcleos de los átomos que están más o menos bloqueados en posiciones fijas. Sin embargo, en los fluidos conductores —como en una batería de automóvil— tanto iones positivos como electrones componen el flujo de la carga eléctrica.

La *tasa* de flujo eléctrico se mide en *amperes*. Un ampere es una tasa de flujo igual a 1 coulomb de carga por segundo. (Recuerda que 1 coulomb, la unidad estándar de carga, es la carga eléctrica de $6.25 \times 10^{18}$ electrones.) En un alambre que porta 5 amperes, por ejemplo, 5 coulombs de carga pasan por cualquier sección transversal del alambre cada segundo. ¡Son muchos electrones! En un alambre que porta 10 amperes, el doble de electrones pasa por cualquier sección transversal cada segundo.

## 23.2 Fuentes de voltaje

Las cargas fluyen sólo cuando se "empujan" o se "impulsan". Para sostener la corriente es indispensable un dispositivo de bombeo apropiado que proporcione una diferencia de potencial eléctrico: un voltaje. Si cargas una esfera metálica positivamente y otra negativamente, puedes desarrollar un gran voltaje entre las esferas. Esta fuente de voltaje no es una buena bomba eléctrica porque, cuando las esferas se conectan con un conductor, los potenciales se igualan con una sola afluencia breve de cargas en movimiento, como si descargaras un generador Van de Graaff. No es práctico. Los generadores o las baterías químicas, por otra parte, son bombas adecuadas en los circuitos eléctricos y pueden mantener un flujo estable.

Las baterías y los generadores eléctricos realizan trabajo para alejar las cargas negativas de las positivas. En general, mas no siempre, en las baterías químicas este trabajo lo realiza la desintegración química de zinc o plomo en ácido, y la energía almacenada en los enlaces químicos se convierte en energía potencial eléctrica.[2] Los generadores, como los alternadores en los automóviles, separan carga mediante inducción electromagnética, un proceso que se describirá en el Capítulo 25. El trabajo realizado por cualquier medio para separar las cargas opuestas se encuentra en las terminales de la batería o generador. Estos valores diferentes de energía por carga crean una diferencia de potencial (voltaje). Este voltaje proporciona la "presión eléctrica" que mueve los electrones por un circuito.

[2]La vida de una batería depende del tiempo que comparte su energía química con los dispositivos del circuito. Al igual que las tuberías de agua que se obstruyen con el uso excesivo y el paso del tiempo, las baterías acumulan resistencia que acorta aún más sus vidas útiles. Una explicación de cómo funcionan las baterías puede encontrarse en casi cualquier libro de química.

La unidad de la diferencia de potencial eléctrico (voltaje) es el *volt*.[3] Una batería de automóvil común proporciona una presión eléctrica de 12 V a un circuito conectado a través de sus terminales. Entonces, a cada coulomb de carga se le suministran 12 J de energía que se hace fluir en el circuito unido a dichas terminales.

Suele haber cierta confusión acerca de la carga que fluye *dentro* de un circuito y el voltaje colocado, o establecido, *en* un circuito. Para distinguir entre estas ideas, piensa en una tubería larga llena de agua. El agua fluirá *dentro* de la tubería si existe una diferencia de presión *en* (o entre) sus extremos. El agua fluye del extremo de presión alta al extremo de presión baja. Sólo el agua fluye, no la presión. De igual modo, la carga eléctrica fluye debido a las diferencias de presión eléctrica (voltaje). Puedes decir que las cargas fluyen *dentro* de un circuito debido a un voltaje aplicado en el circuito. No dices que el voltaje fluye dentro de un circuito. El voltaje no va a ningún lado; la carga es la que se mueve. El voltaje produce una corriente (si hay un circuito completo).

**FIGURA 23.3**
Una fuente inusitada de voltaje. El potencial eléctrico entre la cabeza y la cola de la anguila eléctrica (*Electrophorus electricus*) puede ser de hasta 600 V.

Guarda tus baterías en un lugar frío y seco. Si las pones en un refrigerador durarán un poco más.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿El voltaje entre dos puntos en un circuito eléctrico guarda relación con el flujo de los electrones entre los puntos?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Sí, y pronto verás que guarda relación con la cantidad de energía dada a los electrones.

**pti**

- Mientras Alessandro Volta experimentaba con metales y ácidos en 1791, tocó una cuchara de plata y un pedazo de estaño con la lengua (la saliva es un poco ácida) y las conectó con un pedazo de alambre de cobre. El gusto amargo indicaba electricidad. Prosiguió con el ensamblado de una pila de celdas para construir una batería. En honor a Volta, el potencial eléctrico se mide en "volts". (Toca las dos terminales de una batería de 9 volts con la lengua para experimentar esto por ti mismo.)

## 23.3 Resistencia eléctrica

Se sabe que una batería o generador de algún tipo es el motor principal y la fuente de voltaje de un circuito eléctrico. Cuánta corriente existe depende no sólo del voltaje sino también de la **resistencia eléctrica** que ofrece el conductor al flujo de carga. Esto es similar a la tasa a la que fluye el agua en una tubería, que depende no sólo de la diferencia de presión entre los extremos de la tubería, sino también de la resistencia que ofrece la propia tubería. Una tubería corta ofrece menos resistencia al flujo de agua que una tubería larga; cuanto más ancha sea la tubería, menor será la resistencia. Lo mismo ocurre con la resistencia de los alambres que portan corriente. La resistencia de un alambre depende tanto del grosor como de la longitud del alambre y de su conductividad particular. Los alambres gruesos tienen menos resistencia que los alambres delgados. Los alambres más largos tienen más resistencia que los alambres cortos. El alambre de cobre tiene menos resistencia que el alambre de acero del mismo tamaño. La resistencia eléctrica también depende de la temperatura. Mientras mayores sean los empujones entre los átomos dentro del conductor, mayor será la resistencia que ofrezca el conductor al flujo de carga. En la mayoría de los conductores, un aumento de temperatura significa un aumento de resistencia.[4] La resistencia de algunos materiales llega a cero a temperaturas muy bajas. Se trata de los superconductores estudiados brevemente en el Capítulo 22.

[3]La terminología de esta área de la física puede ser confusa, así que quizá sea conveniente aclarar algunos términos: *potencial eléctrico* y *potencial* significan la misma cosa: energía potencial eléctrica por unidad de carga. Sus unidades son los volts. El término *voltaje* por lo general se usa para indicar la *diferencia* de potencial eléctrico entre dos puntos de una ruta conductora. Las unidades de voltaje también son los volts.

[4]El carbono es una excepción interesante. A medida que aumenta la temperatura, más átomos de carbono se quitan de encima un electrón. Esto aumenta la corriente eléctrica. De modo que la resistencia del carbono disminuye con el aumento de temperatura. Esto y su alto punto de fusión (principalmente) es por lo que el carbono se usa en las lámparas de arco.

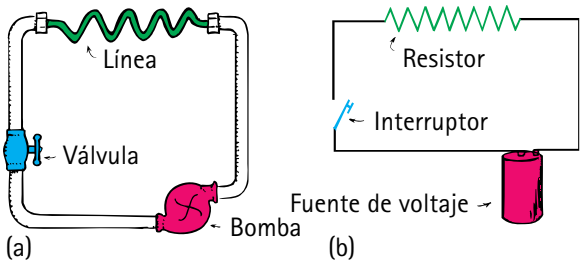



**FIGURA 23.4**
(a) En un circuito hidráulico, una tubería estrecha (verde) ofrece resistencia al flujo de agua.
(b) En un circuito eléctrico, una lámpara u otro dispositivo (que se muestran con el símbolo en zigzag para resistencia) ofrecen resistencia al flujo de electrones.

La resistencia eléctrica se mide en unidades llamadas *ohms*. La letra griega mayúscula omega, Ω, se usa normalmente como símbolo del ohm. Como se mencionó al comienzo de este capítulo, a esta unidad se le llamó así en honor a Georg Simon Ohm, quien, en 1826, descubrió una relación simple y muy importante entre voltaje, corriente y resistencia.

**PUNTO DE CONTROL**

**Cuando los electrones fluyen en el delgado filamento de una lámpara experimentan "fricción". ¿Cuál es el resultado práctico de esto?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**
¡Calor y luz!

La unidad de resistencia eléctrica es el ohm, Ω, como en la antigua canción: "Ω, Ω on the Range".

## 23.4 La ley de Ohm

**VIDEO: Ley de Ohm**

**SCREENCAST: Ley de Ohm**

La relación entre el voltaje, la corriente y la resistencia se resume en la **ley de Ohm**. Ohm descubrió que la corriente en un circuito es directamente proporcional al voltaje establecido en el circuito e inversamente proporcional a la resistencia del circuito. En forma abreviada,

$$\text{Corriente} = \frac{\text{voltaje}}{\text{resistencia}}$$

O, en unidades,

$$\text{Amperes} = \frac{\text{volts}}{\text{ohms}}$$

De modo que, para un circuito dado de resistencia constante, la corriente y el voltaje son proporcionales entre sí.[5] Esto significa que se obtendrá el doble de corriente con el doble de voltaje. Cuanto mayor sea el voltaje, mayor será la corriente. Pero si la resistencia de un circuito se duplica, la corriente será la mitad de lo que sería de otro modo. Cuanto mayor sea la resistencia, menor será la corriente. La ley de Ohm tiene mucho sentido.

La ley de Ohm dice que una diferencia de potencial de 1 V establecida en un circuito que tenga una resistencia de 1 Ω producirá una corriente de 1 A. Si se aplica un voltaje de 12 V al mismo circuito, la corriente será de 12 A. La resistencia de un cable de alimentación típico de una lámpara es mucho menor que 1 Ω, en tanto que una bombilla incandescente típica tiene una resistencia de más de 100 Ω. Una plancha o un tostador eléctrico tiene una resistencia de 15-20 Ω. Recuerda que, para una diferencia de potencial dada, menos resistencia significa más corriente. En el interior de

**FIGURA 23.5**
Por una manguera gruesa fluye más agua que por una manguera delgada conectada al sistema de aguas de la ciudad (misma presión de agua). Lo mismo ocurre con la corriente eléctrica en alambres gruesos y delgados conectados a través de la misma diferencia de potencial.

[5]Muchos textos utilizan $V$ para voltaje, $I$ para corriente y $R$ para resistencia, y expresan la ley de Ohm como $V = IR$. Entonces, $I = \frac{V}{R}$ y $R = \frac{V}{I}$; si cualesquiera dos variables son conocidas, la tercera puede encontrarse. Las unidades se abrevian V para volts, A para amperes y Ω para ohms.

dispositivos eléctricos como computadoras y receptores de televisión, la corriente se regula mediante elementos de circuito llamados *resistores*, cuya resistencia puede ser de algunos ohms o de millones de ohms.

**FIGURA 23.6**
Resistores. El símbolo de resistencia en un circuito eléctrico es –∧∧∧–.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Cuánta corriente consume un resistor de 60 Ω cuando se le aplica un voltaje de 12 V?**
2. **¿Cuál es la resistencia de un sartén eléctrico que consume 12 A cuando se conecta a un circuito de 120 V?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. 1/5 A. De acuerdo con la ley de Ohm: $\text{Corriente} = \dfrac{\text{voltaje}}{\text{resistencia}} = \dfrac{12\ \text{V}}{60\ \Omega} = 0.2\ \text{A}.$
2. 10 Ω. Reordena la ley de Ohm: $\text{Resistencia} = \dfrac{\text{voltaje}}{\text{corriente}} = \dfrac{120\ \text{V}}{12\ \text{A}} = 10\ \Omega.$

## La ley de Ohm y el choque eléctrico

Los efectos dañinos de un choque eléctrico son resultado de la corriente que pasa por el cuerpo. ¿Qué causa un choque eléctrico en el cuerpo: la corriente o el voltaje? Por la ley de Ohm, puedes ver que esta corriente depende tanto del voltaje que se aplica como de la resistencia eléctrica del cuerpo humano. La resistencia del cuerpo, que depende de su condición, varía de unos 100 Ω si está mojado con agua salada, a cerca de 500,000 Ω si la piel está muy seca. Si tocas los dos electrodos de una batería con los dedos secos, y completas el circuito que va de una mano a la otra, puedes esperar que ofrezcas una resistencia de aproximadamente 100,000 Ω. En general, no puedes sentir la corriente producida por 12 V, y 24 V apenas hormiguean. Si tu piel está húmeda, 24 V pueden ser muy incómodos. La Tabla 23.1 indica los efectos de diferentes cantidades de corriente sobre el cuerpo humano.

La corriente es un flujo de carga, puesta en movimiento por el voltaje y frenada por la resistencia.

**TABLA 23.1 EFECTO DE LAS CORRIENTES ELÉCTRICAS SOBRE EL CUERPO**

| Corriente (A) | Efecto |
|---|---|
| 0.001 | Puede sentirse. |
| 0.005 | Es doloroso. |
| 0.010 | Causa contracciones musculares involuntarias (espasmos). |
| 0.015 | Provoca pérdida de control muscular. |
| 0.070 | Si pasa a través del corazón, provoca trastornos graves; puede ser letal si la corriente dura más de 1 s. |

Muchas personas mueren cada año por la corriente de circuitos eléctricos comunes de 120 V. Si tocas una lámpara defectuosa de 120 V con la mano, mientras estás de pie sobre el suelo, hay una "presión eléctrica" de 120 V entre tu mano y el suelo, de modo que es probable que la corriente no sea suficiente para causar un daño serio. Pero si estás de pie descalzo en una tina húmeda conectada por su tubería al suelo, la resistencia entre tú y el suelo es muy pequeña. Tu resistencia global es tan baja que la diferencia de potencial de 120 V puede producir una corriente peligrosa en tu cuerpo. Manipular dispositivos eléctricos mientras te bañas definitivamente no debe hacerse. Las gotas de agua que se acumulan alrededor de los interruptores de encendido de dispositivos como secadoras de cabello pueden conducir corriente al usuario. Aunque el agua destilada es un buen

**VIDEO:** Manipulación de alambres eléctricos

aislante, los iones en el agua de grifo ordinaria reducen mucho la resistencia eléctrica. Estos iones son el resultado de los materiales disueltos, en especial sales. Por lo general, en tu piel queda una capa de sal producida por la transpiración que, cuando tu piel está húmeda, reduce la resistencia de la piel a algunos cientos de ohms o menos, dependiendo de la distancia sobre la que actúa el voltaje.

Para recibir un choque, debe haber una *diferencia* de potencial eléctrico entre una parte de tu cuerpo y otra. La mayor cantidad de la corriente pasará a lo largo de la trayectoria de menor resistencia eléctrica que conecta estos dos puntos. Supón que caes desde un puente y logras agarrarte de un cable eléctrico de alto voltaje, que detiene tu caída. Mientras no toques nada más con un potencial diferente, no recibirás ningún choque. Aun cuando el alambre esté a unos cuantos miles de volts sobre el potencial del suelo y tú cuelgues de él con las dos manos, no fluirá una carga considerable de una mano a la otra. Esto es así porque entre tus manos no hay una diferencia considerable de potencial eléctrico. Sin embargo, si estiras una mano y agarras un alambre con diferente potencial... *¡zap!* Todo mundo ha visto aves paradas en los alambres de alto voltaje. Cada parte de sus cuerpos está al mismo alto potencial que el alambre, de modo que no sienten efectos nocivos.

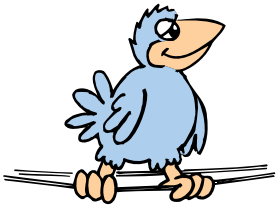


**FIGURA 23.7**
El ave puede pararse sin peligro sobre un alambre de alto potencial, ¡pero más vale que no trate de alcanzar y agarrar un alambre cercano!

**PUNTO DE CONTROL**

**Si las dos patas de un ave sobre el alambre de alto potencial de un cable eléctrico están muy separadas, ¿no recibirá un choque?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**
No, porque no hay una *diferencia* considerable de potencial entre sus patas.

**VIDEO: Aves y alambres de alto voltaje**

La mayoría de los enchufes y tomacorrientes eléctricos de hoy en día están alambrados con tres conectores en lugar de dos. Las dos patas principales de un enchufe eléctrico son para el cable portador de corriente de doble alambre, del cual una parte está "viva" (energizada) y la otra es neutra, mientras que la pata redonda se conecta a un alambre en el sistema eléctrico que está aterrizado: conectado directamente a tierra (Figura 23.8). Por tanto, el aparato eléctrico en el otro extremo del enchufe está conectado a los tres alambres. Si el alambre vivo del aparato por accidente entra en contacto con la superficie metálica del aparato y tú tocas el aparato, podrías recibir un choque peligroso. Esto no ocurrirá cuando la cubierta del aparato esté aterrizada con el alambre a tierra, lo que asegura que la cubierta del aparato siempre esté a potencial de tierra cero.

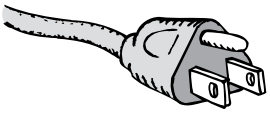


**FIGURA 23.8**
La pata redonda conecta el cuerpo del aparato directamente a tierra. En consecuencia, cualquier carga que se acumule sobre un aparato se conduce a tierra, lo que evita choques accidentales.

El choque eléctrico puede sobrecalentar los tejidos del cuerpo e interrumpir las funciones nerviosas normales. Puede alterar los patrones eléctricos rítmicos que mantienen el latido cardiaco adecuado y puede alterar el centro nervioso que controla la respiración. Para rescatar a una víctima de un choque, lo primero que debes hacer es ubicar y apagar la fuente de electricidad. Luego realizar reanimación cardiopulmonar (RCP) hasta que llegue la ayuda. Para víctimas de un ataque cardiaco, por otra parte, un choque eléctrico administrado de manera correcta en ocasiones puede ayudar a que el latido cardiaco se reanude.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Si la resistencia de tu cuerpo es 100,000 Ω, ¿cuánta corriente experimentarás si tocas las terminales de una batería de 12 V?**
2. **Si tu piel está muy húmeda, de modo que tu resistencia sea de sólo 1,000 Ω, y nuevamente tocas las terminales de la batería, ¿cuánta corriente experimentarás?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

**1.** Corriente $= \frac{\text{voltaje}}{\text{resistencia}} = \frac{12\ \text{V}}{100{,}000\ \Omega} = 0.00012\ \text{A}.$

**2.** Corriente $= \frac{\text{voltaje}}{\text{resistencia}} = \frac{12\ \text{V}}{1{,}000\ \Omega} = 0.012\ \text{A}.$ ¡Ay!

## 23.5 Corriente directa y corriente alterna

La corriente eléctrica puede ser CD o CA. Por *CD*, se entiende **corriente directa**, que se refiere al flujo de cargas en *una dirección*. Una batería produce una corriente directa en un circuito porque cada terminal de una batería siempre tiene el mismo signo: la terminal positiva siempre es positiva, y la terminal negativa siempre es negativa. Los electrones se mueven de la terminal negativa que los repele a la terminal positiva que los atrae, y siempre se mueven por el circuito en la misma dirección. Inclusive si la corriente ocurre en pulsos inestables, siempre que los electrones se muevan sólo en una dirección, es CD.

La **corriente alterna** (CA) actúa como su nombre lo sugiere. Los electrones en el circuito se mueven primero en una dirección y luego en la dirección contraria, alternando de ida y vuelta en torno a posiciones relativamente fijas. Esto se logra al alternar la polaridad del voltaje en el generador u otra fuente de voltaje. Casi todos los circuitos CA comerciales en Estados Unidos involucran voltajes y corrientes que alternan de ida y vuelta a una frecuencia de 60 ciclos por segundo. Esto es una corriente de 60 hertz. En algunos lugares se usan corrientes de 25 hertz, 30 hertz o 50 hertz. En todo el mundo, la mayoría de los circuitos residenciales y comerciales son CA porque la energía eléctrica en la forma de CA puede subirse con facilidad a un voltaje alto para la transmisión a largas distancias con pequeñas pérdidas de calor, y luego bajarse a voltajes convenientes donde se consuma la energía. En el Capítulo 25 estudiarás por qué esto es así.

El voltaje de CA en Estados Unidos suele ser de 120 V. En los primeros días de la electricidad, voltajes más altos quemaban los filamentos de las bombillas eléctricas. Dice la leyenda que primero se adoptaron 110 V como estándar porque hacían que las bombillas de día brillaran tanto como una lámpara de gas. De modo que los cientos de plantas eléctricas construidas en Estados Unidos antes de 1900 producían electricidad a 110 V (o 115 V o 120 V). Para cuando la electricidad se generalizó en Europa, los ingenieros pensaron cómo fabricar bombillas que no se quemaran tan rápido a voltajes más altos. La transmisión de electricidad es más eficiente a voltajes más altos, de modo que Europa adoptó 220 volts como el estándar. Estados Unidos siguió usando 110 V (en la actualidad, oficialmente 120 V) porque ya estaban instalados muchos equipos de 110 V. (Algunos electrodomésticos, como las estufas eléctricas y las secadoras de ropa, en la actualidad usan un voltaje más alto.)

El principal uso de la corriente eléctrica, ya sea CD o CA, es transferir energía de un modo silencioso, flexible y conveniente de un lugar a otro.

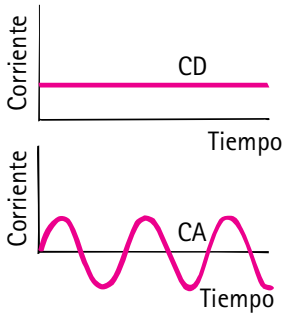



**FIGURA 23.9**
Gráficas en el tiempo de CD y CA.

En los circuitos CA, 120 V es el promedio "valor cuadrático medio" del voltaje. El voltaje real en un circuito CA de 120 V varía entre −170 volts y 170 volts, lo que suministra la misma potencia a una plancha o a un tostador que un circuito CD de 120 V.

**VIDEO: Corriente alterna**

### Conversión de CA a CD

La corriente doméstica es CA. La corriente en un aparato que funciona con baterías, como una laptop, es CD. Puedes hacer funcionar estos aparatos con CA en lugar de baterías si usas un convertidor CA-CD. Además de un transformador para reducir el voltaje (consulta el Capítulo 25), el convertidor utiliza un *diodo*, un pequeño dispositivo electrónico que actúa como válvula de una vía que permite el flujo de electrones sólo en una dirección (Figura 23.10). Dado que la corriente alterna cambia su dirección cada medio ciclo, la corriente pasa por un diodo sólo la mitad de cada periodo. La salida es una CD burda, y está apagada la mitad del tiempo. Para mantener una corriente continua mientras se suavizan los "brincos", se usa un capacitor (Figura 23.11).

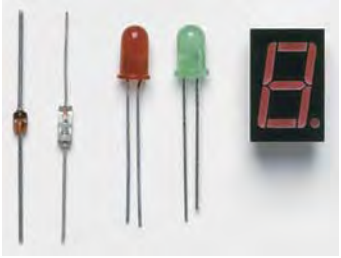


**FIGURA 23.10**
Diodos. Como sugiere el símbolo ⟶|, la corriente fluye en la dirección de la flecha mas no en la dirección contraria.

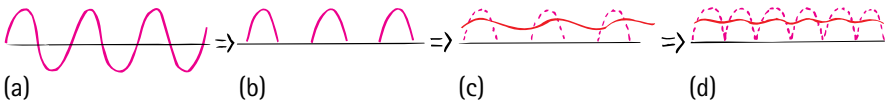



**FIGURA 23.11**
(a) Cuando la entrada a un diodo es CA, (b) la salida es una CD que pulsa. (c) La carga y descarga lentas de un capacitor suministran una corriente continua y más regular. (d) En la práctica, se usa un par de diodos, de modo que no hay brechas en la salida de corriente. El par de diodos invierte la polaridad de los medios ciclos alternos en lugar de eliminarlos.

**FIGURA 23.12**
El agua puede entrar al depósito en forma de chorros o pulsos repetidos, pero la salida es en forma de un torrente bastante regular. Lo mismo ocurre con un capacitor.

Recuerda del Capítulo 22 que un capacitor actúa como un depósito de almacenamiento para carga. Así como se necesita tiempo para que el nivel de agua suba en un depósito cuando se agrega agua, se necesita tiempo para agregar o quitar electrones de las placas de un capacitor. Por tanto, un capacitor produce un efecto retardador sobre los cambios del flujo de carga. Se opone a los cambios de voltaje y suaviza la salida en forma de pulsos.

## 23.6 Rapidez y fuente de los electrones en un circuito

Cuando se acciona el interruptor de luz en la pared y el circuito se completa, ya sea CA o CD, la lámpara parece brillar de inmediato. La corriente se establece a través de los alambres casi a la rapidez de la luz. *No* son los electrones los que se mueven con esta rapidez.[6] Si bien los electrones dentro del metal a temperatura ambiente tienen una rapidez promedio de algunos millones de kilómetros por hora, no forman ninguna corriente porque se mueven en todas las direcciones posibles. No hay un flujo neto en ninguna dirección preferida. Pero, cuando se conecta una batería o un generador, en el interior del conductor se establece un campo eléctrico. Los electrones continúan sus movimientos aleatorios mientras que al mismo tiempo son empujados por este campo. El campo eléctrico es el que puede viajar por un circuito casi a la rapidez de la luz. El alambre conductor actúa como una guía o una "tubería" para las líneas del campo eléctrico (Figura 23.13). En el espacio afuera del alambre, el campo eléctrico tiene un patrón determinado por la ubicación de las cargas eléctricas, incluidas algunas cargas que se acumulan sobre la superficie del alambre. En el interior del alambre, el campo eléctrico se dirige a lo largo del alambre.

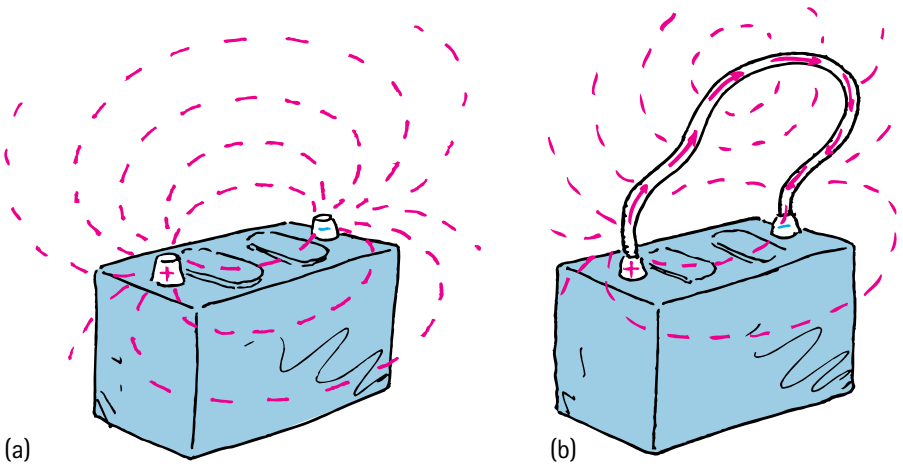



**FIGURA 23.13**
(a) Las líneas de campo eléctrico corren a través del espacio de la terminal positiva a la terminal negativa de una batería. (b) Cuando un alambre metálico grueso se conecta a las dos terminales, un campo eléctrico corre por el alambre, lo que impulsa una corriente, al tiempo que un campo eléctrico también se genera en el espacio que rodea al alambre por la carga que se acumula sobre la superficie del alambre. (No recibirás un choque si tocas este alambre de conexión, ¡pero puedes quemarte porque el alambre seguramente estará muy caliente!)

[6]Se invierte mucho esfuerzo y dinero para construir aceleradores de partículas que aceleren electrones y protones a rapideces cercanas a la de la luz. Si los electrones de un circuito común viajaran con dicha rapidez, con sólo doblar un alambre en un ángulo agudo los electrones que viajaran por el alambre tendrían tal cantidad de movimiento que no podrían dar la vuelta y saldrían disparados, ¡lo que proporcionaría un haz similar al producido por los aceleradores!

Si la fuente de voltaje es CD, como la batería que se muestra en la Figura 23.13, las líneas de campo eléctrico se mantienen en una dirección en el conductor. Los electrones de conducción se aceleran por el campo en una dirección paralela a las líneas de campo. Antes de adquirir una rapidez considerable, "rebotan" en los iones metálicos anclados en sus trayectorias y les transfieren parte de su energía cinética. Es por esto que se calientan los alambres portadores de corriente. Estas colisiones interrumpen el movimiento de los electrones, de modo que la rapidez a la que migran por el alambre es en extremo baja. Este flujo neto de electrones es la *velocidad de deriva*. En un circuito CD común (por ejemplo, el sistema eléctrico de un automóvil) los electrones tienen una velocidad de deriva que promedia alrededor de una centésima de centímetro por segundo. A esta tasa, ¡un electrón tardaría más o menos 3 horas en recorrer 1 metro de alambre! Las corrientes grandes son posibles debido a la gran cantidad de electrones que fluyen. De este modo, aunque una señal eléctrica viaje a casi la rapidez de la luz en un alambre, los electrones que se mueven en respuesta a esta señal en realidad viajan más lento que el paso de un caracol.

En un circuito CA, los electrones de conducción no avanzan en absoluto a lo largo del alambre. Oscilan en forma rítmica de ida y vuelta en torno a posiciones relativamente fijas. Cuando hablas con tus amigos por un teléfono fijo convencional, es el *patrón* del movimiento oscilatorio el que se transmite a través de la ciudad a casi la rapidez de la luz. Los electrones que ya están en los alambres vibran al ritmo del patrón viajero.

Una idea equivocada que suele tenerse sobre las corrientes eléctricas es que la corriente se propaga por los alambres conductores mediante electrones que rebotan entre sí: que un pulso eléctrico se transmite en forma similar a la manera en que el pulso de una ficha de dominó golpeada se transmite a lo largo de una fila de fichas colocadas unas junto a otras. Esto simplemente no es cierto. La idea de las fichas de dominó es un buen modelo para la transmisión del sonido, mas no para la transmisión de la energía eléctrica. Los electrones que tienen libertad de movimiento en un conductor se aceleran por el campo eléctrico impuesto sobre ellos, no debido a que reboten entre sí. Cierto: rebotan unos con otros y con otros átomos, pero esto los desacelera y ofrece resistencia a su movimiento. Los electrones a lo largo de toda la trayectoria cerrada de un circuito reaccionan en forma simultánea al campo eléctrico.

Otra idea equivocada sobre la electricidad es la fuente de los electrones. En un depósito de materiales puedes comprar una manguera que esté vacía de agua. Pero no puedes comprar un trozo de alambre, una "tubería de electrones", que esté vacía de electrones. La fuente de los electrones en un circuito es el material del circuito conductor mismo. Algunas personas creen que los tomacorrientes eléctricos de las paredes de sus casas son una fuente de electrones. Suponen de manera incorrecta que los electrones fluyen desde la planta eléctrica, por las líneas de transmisión y hacia los tomacorrientes de sus casas. Esta suposición es falsa. Los tomacorrientes de las casas son CA. Los electrones no realizan una migración neta por un alambre en un circuito CA.

Cuando conectas una lámpara en un tomacorriente, la *energía* fluye del tomacorriente a la lámpara, no los electrones. La energía es transportada por el campo eléctrico pulsátil y produce el movimiento vibratorio de los electrones que ya existen en el filamento de la lámpara. Si a una lámpara se le imprime un voltaje de 120 V, entonces un promedio de 120 J de energía se disipa por cada coulomb de carga que se hace vibrar. La mayor parte de esta energía eléctrica aparece como calor, en tanto que otra parte se transforma en luz. Las instalaciones eléctricas no venden electrones. Venden *energía*. Tú suministras los electrones.

De este modo, cuando te sacude un choque eléctrico, los electrones que constituyen la corriente en tu cuerpo se originan en tu cuerpo. Los electrones no salen del alambre y pasan a través de tu cuerpo hacia el suelo; lo hace la energía. La energía tan sólo hace que los electrones libres ya existentes en tu cuerpo vibren al unísono. Las vibraciones pequeñas producen hormigueo; las vibraciones grandes pueden ser letales.

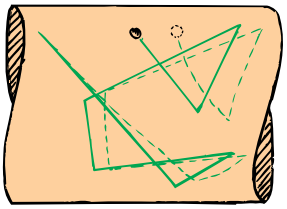


**FIGURA 23.14**
Las líneas sólidas sugieren la trayectoria aleatoria de un electrón que da empujones en una retícula atómica con una rapidez promedio de más o menos 1/200 la rapidez de la luz. Las líneas punteadas sugieren una vista exagerada e idealizada de cómo se altera esta trayectoria cuando se aplica un campo eléctrico. El electrón se mueve hacia la derecha con una *velocidad de deriva* que es muy baja.

Después de fracasar más de 6,000 veces antes de perfeccionar la primera bombilla eléctrica, Edison afirmó que sus ensayos no habían sido fracasos porque logró descubrir 6,000 formas que no funcionaban.

**pti**

- Thomas Edison hizo mucho más que inventar una bombilla incandescente funcional en 1879. Resolvió los problemas de construir los dínamos, los sistemas de cableado y las conexiones para alumbrar la ciudad de Nueva York. Hizo que el teléfono funcionara de manera adecuada y legó la grabación de música y películas. También inventó un método de invención: su laboratorio de New Jersey fue el precursor de los modernos laboratorios de investigación industriales.

¿Por qué es correcto decir que la energía de la batería de un automóvil a final de cuentas proviene del combustible que consume el automóvil?

**PUNTO DE CONTROL**

**Piensa en los integrantes de una banda musical que están de pie y en reposo. Puedes ponerlos en movimiento en dos formas: (1) Da a la última persona de la fila un empujón que viaje en cascada hasta la primera persona de la fila. (2) Emite la orden "adelante, marchen". ¿Cuál de estas dos se asemeja a la forma en que se mueven los electrones en un circuito cuando se cierra el interruptor, y cuál se parece a la forma en la que viaja el sonido?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Emitir la orden "adelante, marchen" se parece a la manera como los electrones se mueven cuando perciben el campo eléctrico que energiza el circuito cuando se cierra el interruptor. Un integrante de la banda que choca contra el otro se parece a la forma en que viaja el sonido.

## 23.7 Potencia eléctrica

**SCREENCAST: Potencia eléctrica**

A menos que sea en un superconductor, una carga que se mueve en un circuito gasta energía. Esto puede resultar en el calentamiento del circuito o en el encendido de un motor. La tasa a la que la energía eléctrica se convierte en otra forma, como energía mecánica, calor o luz, se llama **potencia eléctrica**. La potencia eléctrica es igual al producto de la corriente y el voltaje:[7]

$$\text{Potencia} = \text{corriente} \times \text{voltaje}$$

Si el voltaje se expresa en volts y la corriente en amperes, entonces la potencia se expresa en watts. De modo que, en unidades,

$$\text{Watts} = \text{amperes} \times \text{volts}$$

Una bombilla incandescente de 60 W extrae una corriente de 0.5 A (60 W = 0.5 A × 120 V). Una bombilla de 100 W extrae alrededor de 0.8 A. Es interesante que una lámpara fluorescente compacta (CFL, por sus siglas en inglés) de 26 W proporcione más o menos la misma cantidad de luz que una bombilla incandescente de 100 W, ¡sólo un cuarto de la potencia por la misma luz![8]

La relación entre energía y potencia es un asunto práctico. De la definición de potencia = energía por unidad de tiempo, se deduce que energía = potencia × tiempo. De modo que una unidad de energía puede ser una unidad de potencia multiplicada por una unidad de tiempo, como kilowatt-hora (kWh). Un kilowatt-hora es la cantidad de energía transferida en 1 hora a la tasa de 1 kW. Por tanto, en una localidad en la que la energía eléctrica cueste 15 centavos por kWh, una plancha de 1,000 W puede funcionar durante 1 hora a un costo de 15 centavos. Un refrigerador, que suele clasificarse en aproximadamente 500 W, cuesta menos por una hora, pero mucho más durante el transcurso de un mes.

**PUNTO DE CONTROL**

**A 15¢/kWh, ¿cuánto cuesta hacer funcionar una secadora de cabello de 1,200 W durante 1 h?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

18¢: 1,200 W = 1.2 kW, de modo que 1.2 kW × 1 h × 15¢/kWh = 18¢.

[7]Recuerda, del Capítulo 7, que potencia = trabajo/tiempo; 1 watt = 1 J/s. Observa que las unidades para potencia mecánica y potencia eléctrica coinciden (trabajo y energía se miden ambas en joules):

$$\text{Potencia} = \frac{\text{carga}}{\text{tiempo}} \times \frac{\text{energía}}{\text{carga}} = \frac{\text{energía}}{\text{tiempo}}$$

[8]Resulta que la fórmula de potencia, $P = IV$, no funciona para las CFL. Esto es así porque, en una CFL, el voltaje alterno y la corriente están fuera de fase una con respecto a la otra, y el producto de la corriente y el voltaje es mayor que el consumo de potencia real. ¿Qué tan mayor? Revisa los datos impresos en la base de una CFL.

## 23.8 Lámparas

El brillo de las bombillas incandescentes puede determinarse por su vataje. Una bombilla de 100 W, por ejemplo, es más brillante que una bombilla de 60 W. Pero la mayor parte de la potencia que disipan estas bombillas no es luz, es calor. Al menos 90% de la energía transferida por una bombilla incandescente es calor. Por otra parte, las lámparas fluorescentes emiten mucho menos calor, por lo que puedes tocarlas sin quemarte. Las bombillas incandescentes se están sustituyendo por las CFL, que son un tipo de lámpara fluorescente que embona en un portalámparas estándar. Por el mismo vataje, las CFL emiten mucho más luz y mucho menos calor que las incandescentes. Es por ello que puedes sustituir una bombilla incandescente de 100 W con una CFL de alrededor de 25 W y obtener más o menos la misma cantidad de luz. De modo que, a menos que uses bombillas incandescentes para calentar una habitación (cosa que hacen los granjeros en los gallineros durante el invierno), es probable que te convenga más usar una CFL con un vataje menor. Además, la duración de las CFL suele ser de más de 10 veces la de las bombillas incandescentes.

Una fuente de luz que dura incluso más tiempo es el diodo emisor de luz (LED, por sus siglas en inglés); el más rudimentario de éstos es la pequeña luz roja que te dice si tu computadora u otro dispositivo electrónico están encendidos o apagados. Ahora existen LED más grandes para iluminación general. Su costo más alto se compensa con el ahorro de energía durante la larga vida de las bombillas.

Con las CFL y los LED que se usan en la actualidad, espera que las "antiguas" bombillas incandescentes sean historia. Y espera que las LED sustituyan a las CFL. En el Capítulo 30 se regresará a la física de las CFL y las LED.

Un inconveniente de las CFL son las pequeñas cantidades de mercurio que contienen. No obstante, la fuente más grande de emisiones de mercurio en el ambiente son las plantas eléctricas que queman carbón. De acuerdo con la EPA, cuando se usa la energía del carbón para iluminar una sola lámpara incandescente durante su vida normal, se libera más mercurio al ambiente del que existe en una CFL con una luminosidad semejante.

**FIGURA 23.15**
La potencia y el voltaje para esta CFL están dados como "13 W 120 V".

**FIGURA 23.16**
Las versiones más grandes de este LED común ahora tienen portalámparas con rosca.

## 23.9 Circuitos eléctricos

Cualquier trayectoria a lo largo de la cual puedan fluir los electrones es un *circuito*. Para un flujo continuo de electrones debe haber un circuito completo, sin brechas. Por lo general, una brecha la proporciona un interruptor eléctrico que puede abrirse o cerrarse para cortar o permitir el flujo de energía. La mayoría de los circuitos tiene más de un dispositivo que recibe energía eléctrica. En general, estos dispositivos se conectan en un circuito en una de dos formas, en *serie* o en *paralelo*. Cuando se conectan en serie, forman una sola ruta para el flujo de electrones entre las terminales de la batería, generador o tomacorriente de la pared (que sólo es una extensión de estas terminales). Cuando se conectan en paralelo, forman ramas, cada una de las cuales es una ruta aparte para el flujo de electrones. Las conexiones en serie y en paralelo tienen sus propias características distintivas. Se analizarán de manera breve los circuitos que utilizan estos dos tipos de conexiones.

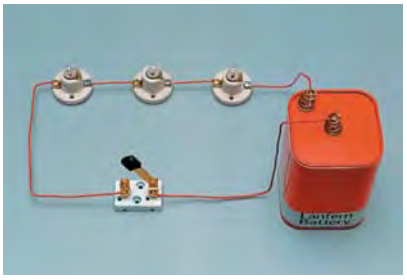
**VIDEO: Circuitos eléctricos**

**SCREENCAST: Caída de voltaje**

## Circuitos en serie

**SCREENCAST: Resistencia equivalente**

En la Figura 23.17 se muestra un **circuito en serie** simple. Todos los aparatos, lámparas en este caso, están conectados extremo con extremo y forman una sola ruta para los electrones. La misma corriente existe casi de inmediato en las tres lámparas, y también en la batería, cuando el interruptor se cierra. Cuanto más grande sea la corriente de una lámpara, más brillante es. Los electrones no se "apilan" en ninguna lámpara, sino que fluyen *a través* de cada lámpara, en forma simultánea. Algunos electrones se alejan de la terminal negativa de la batería, algunos se mueven hacia la terminal positiva y algunos se mueven por el filamento de cada lámpara. Con el tiempo, es probable que los electrones se muevan por todo el circuito (la misma cantidad de corriente pasa a través de la batería). Ésta es la única ruta de los electrones a través del circuito. Un rompimiento en alguna parte de la ruta resulta en un circuito abierto, y el flujo de electrones se interrumpe. Con quemar el filamento de una de las lámparas o tan sólo abrir el interruptor, puede ocurrir dicho rompimiento.



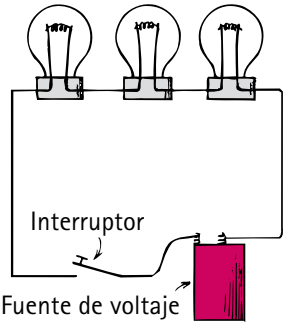



**FIGURA 23.17**
Un circuito en serie simple. La batería de 6 V proporciona 2 V a cada lámpara.

## CELDAS DE COMBUSTIBLE

Una batería es un dispositivo de almacenamiento de energía. Una vez que la energía química almacenada se convierte en energía eléctrica, su energía se agota. Entonces debe desecharse (si se trata de una batería desechable) o recargarse con un flujo opuesto de electricidad.

Una *celda de combustible*, por otra parte, convierte la energía química de un combustible en energía eléctrica de manera continua e indefinida, en tanto se le suministre el combustible. En una versión, el combustible de hidrógeno sufre una reacción química con el oxígeno proveniente del aire y produce electrones e iones —y agua—. Los iones fluyen internamente dentro de la celda en una dirección; los electrones fluyen externamente por un circuito unido en la otra dirección. Dado que esta reacción convierte directamente la energía química en electricidad, es más eficiente que si el combustible se quemara para producir calor, lo cual, a su vez, produce vapor que acciona turbinas para generar electricidad. El único "producto de desecho" de tal celda de combustible es agua pura, ¡adecuada para beber!

El transbordador espacial utiliza celdas de combustible de hidrógeno para satisfacer sus necesidades eléctricas. (Su hidrógeno y oxígeno se llevan a bordo en contenedores presurizados.) Las celdas también producen más de 100 galones de agua potable para los astronautas durante una misión habitual de una semana de duración. En la Tierra, los investigadores perfeccionan las celdas de combustible para varios tipos de vehículos. En muchas ciudades circulan autobuses con celdas de combustible, como Vancouver, Columbia Británica y Chicago, Illinois. En el futuro, tanto los edificios comerciales como las casas podrán dotarse con celdas de combustible como una alternativa para recibir la electricidad proveniente de las estaciones regionales.

Entonces, ¿por qué las celdas de combustible no están tan difundidas en la actualidad? Hoy en día son más costosas que otras fuentes de electricidad. Pero, sobre todo, existe la pregunta sobre la disponibilidad del combustible elegido —hidrógeno—. Si bien el hidrógeno es el elemento más abundante en el Universo, y es abundante en los alrededores inmediatos, está alojado en moléculas de agua e hidrocarburos. No está disponible en estado libre (un hecho que AHORA pasan por alto las personas que celebran el uso de vehículos impulsados con hidrógeno). Para separar el hidrógeno de las moléculas en las que se encuentra firmemente ligado se necesita energía. La energía necesaria para producir hidrógeno en la actualidad la proporcionan fuentes de energía convencionales.

En efecto, el hidrógeno es un medio de almacenamiento de energía. Al igual que la electricidad, se crea en un lugar y se utiliza en otro. El hidrógeno es un gas muy volátil, difícil de almacenar, transportar y usar con seguridad. Las celdas de combustible serán atractivas en el futuro, cuando se reduzcan al mínimo estas dificultades, cuando baje el costo de las celdas de combustible y, principalmente, cuando el hidrógeno necesario para alimentarlas se genere mediante otras fuentes de energía, como la eólica o la solar.

El circuito que se muestra en la Figura 23.17 ilustra las importantes características de los circuitos en serie:

1. La corriente eléctrica tiene una sola ruta a través del circuito. Esto significa que la corriente que pasa a través de la resistencia de cada dispositivo eléctrico a lo largo de la ruta es la misma.
2. A esta corriente se resiste la resistencia del primer dispositivo, la resistencia del segundo y también la del tercero, de modo que la resistencia total a la corriente en el circuito es la suma de cada una de las resistencias a lo largo de la ruta del circuito.
3. La corriente en el circuito es numéricamente igual al voltaje suministrado por la fuente, dividido entre la resistencia total del circuito. Esto coincide con la ley de Ohm.
4. El voltaje suministrado es igual a la suma de cada una de las "caídas de voltaje" a través de cada dispositivo. Esto es consistente con el hecho de que la energía total suministrada al circuito es igual a la suma de las energías suministradas a cada dispositivo.
5. La caída de voltaje a través de cada dispositivo es proporcional a su resistencia: la ley de Ohm se aplica por separado a cada dispositivo. Esto se deduce del hecho de que más energía se disipa cuando una corriente pasa a través de una resistencia grande que cuando la misma corriente pasa a través de una resistencia pequeña.

Es fácil ver la principal desventaja de un circuito en serie: si un dispositivo falla, la corriente en todo el circuito cesa. En tiempos pasados, las luces de los árboles de navidad estaban conectadas en serie. Cuando una bombilla se fundía, era divertido y entretenido (o frustrante) tratar de localizar la bombilla que había que sustituir.

Casi todos los circuitos están alambrados de modo que sea posible hacer funcionar varios dispositivos eléctricos, cada uno de manera independiente de los demás. En tu casa, por ejemplo, una lámpara puede encenderse o apagarse sin afectar el funcionamiento de otras lámparas o dispositivos eléctricos. Esto es así porque dichos dispositivos no están conectados en serie, sino en paralelo unos con otros.

¿Qué es lo que se "agota" en un circuito eléctrico: la corriente o la energía?

**SCREENCAST: Resistencias de un circuito**

**pti**

- Las palabras *abierto* y *cerrado* como se aplican a una puerta son diferentes cuando se aplican a los circuitos eléctricos. Para una puerta, *abierto* significa paso libre y *cerrado* significa bloqueo. Con los interruptores eléctricos, los términos tienen significados opuestos: *abierto* significa sin flujo y *cerrado* significa libre paso de electrones.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **En un circuito en serie, ¿qué ocurre con la corriente de las demás lámparas si se quema una lámpara?**
2. **En un circuito en serie, ¿qué ocurre con el brillo de la luz de cada lámpara cuando se agregan más lámparas al circuito?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

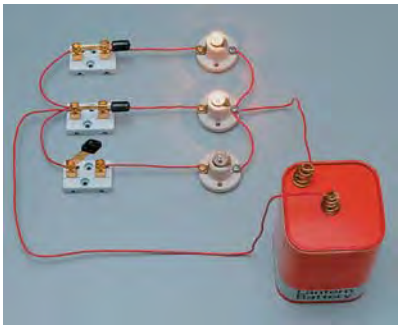
1. El circuito se rompe y todas las lámparas se apagan.
2. Agregar más lámparas en serie produce una resistencia de circuito más grande. Esto reduce la corriente en el circuito. Todos los voltajes deben sumarse para dar el mismo voltaje total, de manera que la caída de voltaje a través de cada lámpara también disminuye. Dado que la potencia es el producto del voltaje y la corriente, estos dos cambios actúan para volver menos brillantes las lámparas.

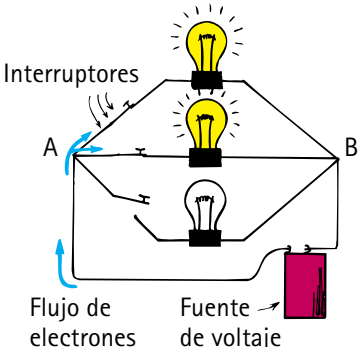
## Circuitos en paralelo

En la Figura 23.18 se muestra un **circuito en paralelo** simple. Las tres lámparas están conectadas a los mismos dos puntos, A y B. Se dice que están *conectados en paralelo* los dispositivos eléctricos que están directamente conectados a los mismos dos puntos de un circuito eléctrico. La ruta para la corriente desde una terminal de la batería hasta la otra se completa sólo si *una* lámpara está encendida. En esta ilustración, el circuito se ramifica en tres rutas distintas de la A a la B. Un rompimiento en una ruta no interrumpe el flujo de carga en las otras rutas. Cada dispositivo funciona de forma independiente de los demás dispositivos.

**SCREENCAST: Bombillas en paralelo**

**FIGURA 23.18**
Circuito en paralelo simple. Una batería proporciona 6 V a cada lámpara.






El circuito que se muestra en la Figura 23.18 ilustra las principales características de las conexiones en paralelo:

1. Cada dispositivo se conecta a los mismos dos puntos A y B del circuito. Por tanto, el voltaje es el mismo a través de cada dispositivo.
2. La corriente se divide entre las ramas paralelas. La ley de Ohm se aplica por separado a cada rama.
3. La corriente total del circuito es igual a la suma de las corrientes en sus ramas paralelas. Esta suma es igual a la corriente de la batería u otra fuente de voltaje.
4. A medida que aumenta el número de ramas paralelas, la resistencia global del circuito *disminuye*. La resistencia global se reduce con cada ruta agregada entre cualesquiera dos puntos del circuito. Esto significa que la resistencia global del circuito es menor que la resistencia de cualquiera de las ramas.

**SCREENCAST: Demostración de una batería**

**SCREENCAST: Potencia de una batería**

## PUNTO DE CONTROL

1. **En un circuito en paralelo, ¿qué sucede con la corriente en otras lámparas si una de las lámparas se quema?**
2. **En un circuito en paralelo, ¿qué pasa con el brillo de la luz de cada lámpara cuando se agregan más lámparas en paralelo?**
3. **¿Qué ocurre con la corriente de la batería cuando se agregan más lámparas en paralelo?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Si una de las lámparas se quema, las demás lámparas no son afectadas. Esto se debe a que la corriente en cada rama, de acuerdo con la ley de Ohm, es igual a voltaje/resistencia, y como ningún voltaje ni ninguna resistencia se modifican en las otras ramas, la corriente en dichas ramas no es afectada.
2. El brillo de cada lámpara no cambia cuando se introducen (o se quitan) otras lámparas.
3. La corriente de la batería aumenta por una cantidad que alimenta a cada rama agregada. En el circuito global, las rutas agregadas significan una reducción de la resistencia. (También existe una resistencia en una batería, que aquí se supone despreciable.)

## Circuitos en paralelo y sobrecarga

La electricidad dentro de una casa por lo general se alimenta mediante dos alambres llamados *líneas*. Estas líneas, que tienen una resistencia muy baja, se ramifican en circuitos en paralelo que conectan las luces del techo y los tomacorrientes de pared de cada habitación. Las luces y los tomacorrientes se conectan en paralelo, de modo que a todas llega el mismo voltaje, por lo general entre 110-120 V. A medida que se conectan más dispositivos y se encienden, más rutas para la corriente resultan en una reducción de la resistencia combinada de cada circuito. En consecuencia, en los circuitos pasa una mayor cantidad de corriente. La suma de estas corrientes es igual a la corriente de línea, que puede rebasar los límites de seguridad. Se dice entonces que el circuito está *sobrecargado*.

Puedes ver cómo ocurre la sobrecarga si consideras el circuito de la Figura 23.19. La línea de suministro está conectada en paralelo a un tostador eléctrico que extrae 8 A, a un calefactor eléctrico que extrae 10 A y a una lámpara eléctrica que extrae 2 A. Cuando sólo funciona el tostador y extrae 8 A, la corriente de línea total es de 8 A. Cuando el calefactor también opera, la corriente de línea total aumenta a 18 A (8 A hacia el tostador y 10 A hacia el calefactor). Si enciendes la lámpara, la corriente de línea aumenta a 20 A. Conectar más dispositivos aumenta la corriente todavía más. Conectar demasiados dispositivos en el mismo circuito sobrecalienta los alambres que alimentan el circuito, lo que puede provocar un incendio.

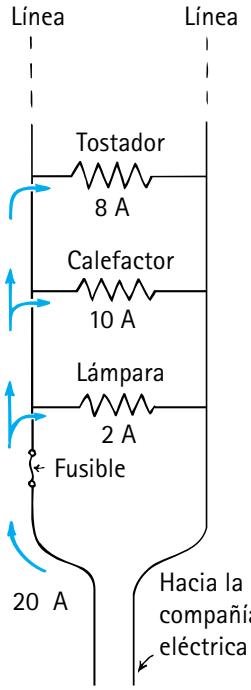



**FIGURA 23.19**
Diagrama de un circuito para los electrodomésticos conectados a un circuito doméstico.

## Fusibles de seguridad

Para evitar la sobrecarga de los circuitos, pueden conectarse fusibles en serie a lo largo de la línea de suministro. De esta forma, toda la corriente de la línea debe pasar por el fusible. El fusible que se muestra en la Figura 23.20 está construido con un listón de alambre que se calentará y fundirá a una corriente determinada. Si el fusible está clasificado en 20 A, pasará 20 A pero no más. Una corriente mayor que 20 A fundirá el fusible, que se "apagará" y romperá el circuito. Antes de sustituir un fusible quemado, debes determinar y solucionar la causa de la sobrecarga. Con frecuencia, el aislamiento que separa a los alambres en un circuito se corroe y permite que los alambres se toquen. Esto reduce mucho la resistencia en el circuito, lo que acorta efectivamente la ruta del circuito, y se llama *cortocircuito*.

En las construcciones modernas, los fusibles se han sustituido por disyuntores (interruptor automático), que utilizan imanes o tiras bimetálicas para abrir un interruptor cuando la corriente es muy grande. Las compañías eléctricas usan disyuntores para proteger sus líneas durante todo el recorrido de vuelta hasta los generadores.

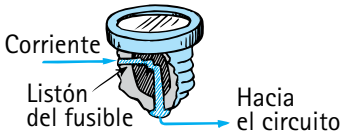



**FIGURA 23.20**
Fusible de seguridad.

**SCREENCAST: Combinación de circuitos**

**FIGURA 23.21**
El electricista Dave Hewitt muestra un fusible de seguridad y un disyuntor. Él prefiere los antiguos fusibles, que considera más confiables.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Diferencia de potencial.** Diferencia en el potencial eléctrico entre dos puntos, medida en volts (sinónimo de *diferencia de voltaje* o simplemente *voltaje*).

**Corriente eléctrica.** Flujo de carga eléctrica que transporta energía de un lugar a otro, medida en amperes, donde 1 A es el flujo de $6.25 \times 10^{18}$ electrones por segundo, o 1 coulomb por segundo.

**Resistencia eléctrica.** Propiedad de un material que resiste la corriente eléctrica, medida en ohms (Ω).

**Ley de Ohm.** Enunciado que establece que la corriente en un circuito varía en proporción directa a la diferencia de potencial o voltaje en el circuito, y en proporción inversa a la resistencia del circuito:

$$\text{Corriente} = \frac{\text{voltaje}}{\text{resistencia}}$$

Una diferencia de potencial de 1 V a través de una resistencia de 1 Ω produce una corriente de 1 A.

**Corriente directa (CD).** Partículas con carga eléctrica que fluyen sólo en una dirección.

**Corriente alterna (CA).** Partículas con carga eléctrica que invierten su dirección en forma repetida y vibran en torno a posiciones relativamente fijas. En Estados Unidos, la tasa de vibración por lo general es de 60 Hz.

**Potencia eléctrica.** Tasa de transferencia de energía o tasa de realización de trabajo; es la cantidad de energía por unidad de tiempo, que puede calcularse como el producto de la corriente y el voltaje:

$$\text{Potencia} = \text{corriente} \times \text{voltaje}$$

La potencia eléctrica se mide en watts (o kilowatts), donde $1\ \text{W} = 1\ \text{A} \times 1\ \text{V} = 1\ \text{J/s}$.

**Circuito en serie.** Circuito eléctrico en el cual los dispositivos eléctricos están conectados a lo largo de una sola trayectoria de alambre, de modo que en cada dispositivo pasa la misma corriente.

**Circuito en paralelo.** Circuito eléctrico en el cual los dispositivos eléctricos están conectados de tal forma que el mismo voltaje actúa a través de cada uno, y cualquiera de ellos completa el circuito de manera independiente de todos los demás.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 23.1 Flujo de carga y corriente eléctrica

1. ¿Qué condición es necesaria para el flujo de calor? ¿Qué condición análoga es necesaria para el flujo de carga?
2. ¿Qué condición es necesaria para el flujo sostenido de agua en una tubería? ¿Qué condición análoga es necesaria para el flujo sostenido de carga en un alambre?
3. ¿Por qué los *electrones*, y no los *protones*, son los principales portadores de carga en los alambres metálicos?
4. ¿Qué es exactamente un ampere?

### 23.2 Fuentes de voltaje

5. Menciona dos tipos de "bombas eléctricas" prácticas.
6. ¿Cuánta energía se suministra a cada coulomb de carga que fluye por una batería de 12 V?
7. ¿La carga eléctrica fluye *dentro* de un circuito o *a través* de un circuito? ¿El voltaje fluye *dentro* de un circuito o se *establece en* un circuito?

### 23.3 Resistencia eléctrica

8. ¿El agua fluirá con más facilidad a través de una tubería ancha o de una tubería estrecha? ¿La corriente fluirá con más facilidad a través de un alambre grueso o de un alambre delgado?
9. ¿Calentar un alambre metálico aumenta o disminuye su resistencia eléctrica?
10. ¿Cuál es la unidad de resistencia eléctrica?

### 23.4 La ley de Ohm

11. Si el voltaje establecido en un circuito se mantiene constante mientras la resistencia se duplica, ¿qué cambio ocurre en la corriente?
12. Si la resistencia de un circuito permanece constante mientras el voltaje en el circuito disminuye a la mitad de su valor anterior, ¿qué cambio ocurre en la corriente?
13. ¿Cómo es que la humedad afecta la resistencia de tu cuerpo?
14. ¿Cuál es la función de la tercera pata redonda en un moderno enchufe eléctrico doméstico?

### 23.5 Corriente directa y corriente alterna

15. ¿Una batería produce CD o CA? ¿El generador de una central eléctrica produce CD o CA?
16. ¿Qué quiere decir que una corriente determinada es de 60 Hz?
17. ¿Qué propiedad de un diodo le permite convertir CA a CD pulsátil?
18. Un diodo convierte CA en CD pulsátil. ¿Qué dispositivo eléctrico regula la CD pulsátil en una CD más regulada?

### 23.6 Rapidez y fuente de los electrones en un circuito

19. ¿Cuál es el error cuando se dice que los electrones en un circuito común operado por baterías viajan aproximadamente a la rapidez de la luz?
20. ¿Por qué se calienta un alambre que porta corriente eléctrica?
21. ¿Qué se entiende por velocidad de deriva?
22. Una ficha de dominó inclinada envía un pulso a lo largo de una fila de fichas de dominó que están de pie. ¿Ésta es una buena analogía de la forma en que viaja la corriente eléctrica, el sonido o ambas?
23. ¿Cuál es el error cuando se dice que la fuente de los electrones en un circuito es la batería o el generador?

24. Cuando realizas el pago de tu factura por el consumo eléctrico doméstico al final del mes, ¿por cuál te cobran: voltaje, corriente, potencia o energía?
25. ¿Dónde se originan los electrones que producen un choque eléctrico cuando tocas un conductor cargado?

### 23.7 Potencia eléctrica

26. ¿Cuál es la relación entre la potencia eléctrica, la corriente y el voltaje?
27. ¿Cuál de éstos es una unidad de potencia y cuál es una unidad de energía: watt, kilowatt, kilowatt-hora?

### 23.8 Lámparas

28. ¿Cómo es que el calor emitido por las lámparas afecta su eficiencia?

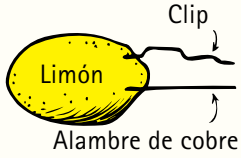
### 23.9 Circuitos eléctricos

29. En un circuito de dos lámparas en serie, si la corriente a través de una lámpara es de 1 A, ¿cuál es la corriente a través de la otra lámpara? Defiende tu respuesta.
30. Si un voltaje de 6 V se establece dentro del circuito de la pregunta anterior y el voltaje dentro de la primera lámpara es de 2 V, ¿cuál es el voltaje dentro de la segunda lámpara? Defiende tu respuesta.
31. En un circuito de dos lámparas en paralelo, si existe un voltaje de 6 V dentro de una lámpara, ¿cuál es el voltaje dentro de la otra lámpara?
32. ¿Cuál es la diferencia entre la suma de las corrientes que pasan por las ramas de un circuito en paralelo simple y la corriente en la fuente de voltaje?
33. ¿Cuál es la función de los fusibles o disyuntores en un circuito?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

34. Para hacer una celda eléctrica se colocan dos placas de diferentes materiales que tengan diferentes afinidades para los electrones, en una solución conductora. El voltaje de una celda depende de los materiales utilizados y de las soluciones en donde se colocan, no del tamaño de las placas. (Con frecuencia, a una celda se le llama batería, pero estrictamente hablando, una batería es una serie de celdas; por ejemplo, seis celdas en una batería automotriz de 12 V.) Tú puedes fabricar una celda simple de 1.5 V si colocas una tira de cobre y una tira de cinc en un vaso con agua salada.

    Una celda sencilla de construir es la celda cítrica. Pega un clip estirado y un trozo de alambre de cobre en un limón. Mantén los extremos del alambre juntos, más no en contacto, y coloca los extremos sobre tu lengua. El leve hormigueo que sientes y el gusto metálico que experimentas resultan de una ligera corriente eléctrica proveniente de la celda cítrica a través de los alambres cuando tu lengua húmeda cierra el circuito.




35. Examina el medidor eléctrico de tu casa. Es probable que esté en el sótano o afuera de tu casa. Verás que, además de los diales parecidos a relojes del medidor, hay un disco de aluminio que gira entre los polos de imanes cuando la corriente eléctrica entra a tu casa. Cuanta más corriente eléctrica, más rápido gira el disco. La rapidez del disco es directamente proporcional al número de watts usados; por ejemplo, gira 5 veces más rápido para 500 W que para 100 W.

    Puedes usar el medidor para determinar cuántos watts utiliza un aparato eléctrico. Primero, asegúrate de que todos los aparatos eléctricos de tu casa estén desconectados (está bien ignorar los relojes eléctricos y otros aparatos de 2 W, los cuales difícilmente serán apreciables). El disco estará prácticamente estacionario. Luego conecta una bombilla de 100 W y observa cuántos segundos tarda el disco en dar cinco revoluciones completas. La mancha negra pintada sobre el borde del disco facilita esto. Desconecta la bombilla de 100 W y conecta un aparato con vataje desconocido. De nuevo, cuenta los segundos para cinco revoluciones. Si tarda el mismo tiempo, es un aparato de 100 W; si tarda el doble de tiempo, es un aparato de 50 W; la mitad del tiempo, un aparato de 200 W; y así sucesivamente. De esta forma puedes calcular el consumo de potencia de los aparatos con bastante exactitud.
36. Envía una carta a la abuela y convéncela de que cualquier choque eléctrico que haya podido recibir durante su vida se debió al movimiento de electrones que ya estaban en su cuerpo, no a electrones provenientes de alguna otra parte.

## SUSTITUYE Y LISTO (FAMILIARIZACIÓN CON ECUACIONES)

$$\textit{Ley de Ohm: } I = \frac{V}{R}$$

37. Un tostador tiene un elemento calefactor de 15 Ω y se conecta a un tomacorriente de 120 V. Demuestra que la corriente extraída por el tostador es de 8 A.
38. Cuando tus dedos (resistencia 1,000 Ω) tocan las terminales de una batería de 6 V, demuestra que la pequeña corriente que se mueve por tus dedos es de 0.006 A.
39. Calcula la corriente en el filamento de 240 Ω de una bombilla conectada a una línea de 120 V.

$$\textit{Potencia} = I \times V$$

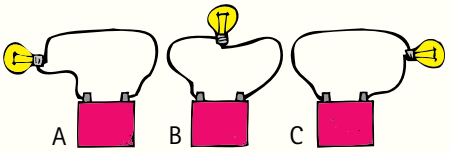
40. Un juguete eléctrico extrae 0.5 A de un tomacorriente de 120 V. Demuestra que el juguete consume 60 W de potencia.
41. Calcula la potencia de una secadora de cabello que opera en 120 V y extrae una corriente de 10 A.

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

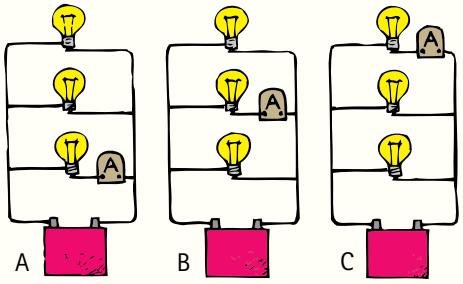
42. ¿Cuál es el efecto sobre la corriente en un alambre, si tanto el voltaje en él como su resistencia se duplican? ¿Si ambos se reducen a la mitad?
43. El vataje marcado en una bombilla no es una propiedad inherente de la bombilla, sino que depende del voltaje al cual se conecta, por lo general 110 V o 120 V. ¿Cuántos amperes fluyen por una bombilla de 60 W conectada a un circuito de 120 V?
44. Reordena la ecuación corriente = voltaje/resistencia para expresar la *resistencia* en términos de la corriente y el voltaje. Luego resuelve lo siguiente: por cierto aparato en un circuito de 120 V pasa una corriente de 20 A. ¿Cuál es la resistencia del aparato (cuántos ohms)?
45. Con la fórmula potencia = corriente × voltaje, encuentra la corriente extraída por un tostador de 1,200 W conectado a 120 V. Luego, con el método del problema anterior, demuestra que la resistencia del tostador es 12 Ω.
46. La carga total que la batería de un automóvil puede suministrar sin recargarse está dada en términos de ampere-horas. Una batería común de 12 V tiene una clasificación de 60 ampere-horas (60 A por 1 h, 30 A por 2 h, y así sucesivamente). Supón que olvidas apagar los faros de tu automóvil luego de estacionarlo. Si cada uno de los dos faros extrae 3 A, ¿cuánto tiempo transcurrirá antes de que tu batería "se muera"?
47. Demuestra que hacer funcionar una lámpara de 100 W de manera continua durante 1 semana, cuando la tarifa de la compañía eléctrica es de 15¢/kWh, cuesta $2.52.
48. Una lamparilla de 4 W se conecta en un circuito de 120 V y funciona de manera continua durante 1 año. Encuentra lo siguiente: (a) la corriente que extrae, (b) la resistencia de su filamento, (c) la energía consumida en un año. (d) Luego demuestra que, para una tarifa de 15¢/kWh, el costo para un año de operación es de $5.25.
49. Una plancha eléctrica conectada a una fuente de 100 V extrae 9 A de corriente. Demuestra que la cantidad de calor que genera en un minuto es de casi 60,000 J.
50. Demuestra en el problema anterior que 540 C de carga fluyen por la plancha en 1 minuto.
51. En periodos de máxima demanda, las compañías eléctricas reducen su voltaje. Esto les ahorra potencia (¡y dinero!). Para ver el efecto, piensa en una cafetera de 1,200 W que extrae 10 A cuando se conecta a 120 V. Supón que el voltaje se reduce en 10% a 108 V. ¿En cuánto disminuye la corriente? ¿En cuánto disminuye la potencia? (*Precaución*: la etiqueta de 1,200 W sólo es válida cuando se aplican 120 V. Cuando el voltaje se reduce, la corriente se reduce, de modo que baja la potencia de salida de las bobinas calefactoras de la cafetera, lo cual enfría la bobina y baja su resistencia. Sin embargo, para este problema supón que el cambio de resistencia es moderado.)

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

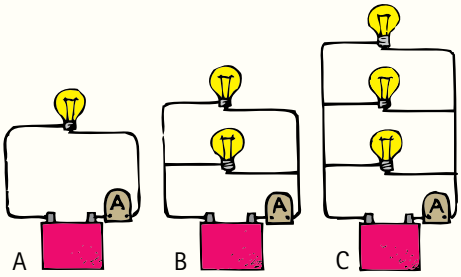
52. Clasifica los circuitos ilustrados de acuerdo con el brillo de las bombillas idénticas, de la más brillante a la menos brillante.



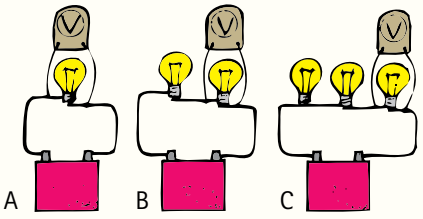

53. Las bombillas que se muestran son idénticas. Un amperímetro se coloca en diferentes lugares, como se muestra. Clasifica las lecturas de corriente en el amperímetro, de mayor a menor.



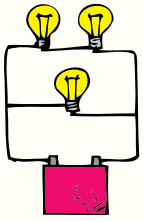

54. Todas las bombillas son idénticas en los circuitos mostrados. Un amperímetro se conecta junto a la batería, como se muestra. Clasifica las lecturas de corriente en el amperímetro, de mayor a menor.




55. Todas las bombillas son idénticas en los circuitos mostrados. Un voltímetro se conecta a través de una sola bombilla para medir la caída de voltaje a través de ella. Clasifica las lecturas de voltaje de mayor a menor.

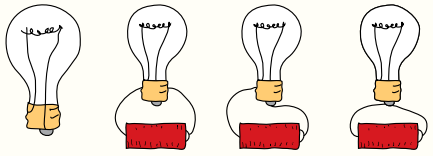



56. Considera las tres partes del circuito: A, la rama superior con dos bombillas; B, la rama de en medio con una bombilla; C, la batería.
    a. Clasifica las corrientes a través de cada una, de mayor a menor.
    b. Clasifica los voltajes en cada una, de mayor a menor.

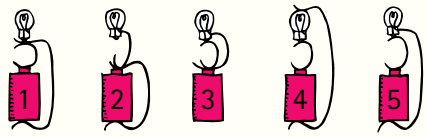


## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

57. ¿Qué condición es necesaria para tener un flujo sostenido de carga eléctrica a través de un medio conductor?
58. ¿Cuáles dos cosas pueden hacerse para aumentar la cantidad de flujo en una tubería de agua? De igual modo, ¿cuáles dos cosas pueden hacerse para aumentar la corriente en un circuito eléctrico?
59. Considera una tubería de agua que se ramifica en dos tuberías más pequeñas. Si el flujo de agua es de 10 galones por minuto en la tubería principal y de 4 galones por minuto en una de las ramas, ¿cuánta agua por minuto fluye en la otra rama?
60. Considera un circuito con un alambre principal que se ramifica en otros dos alambres. Si la corriente es de 10 A en el alambre principal y de 4 A en una de las ramas, ¿cuánta corriente hay en la otra rama?
61. Un ejemplo de sistema hidráulico es una manguera de jardín que riega un jardín. Otro es el sistema de enfriamiento de un automóvil. ¿Cuál de estos sistemas muestra un comportamiento más análogo con un circuito eléctrico? Explica.
62. ¿Qué ocurre con el brillo de la luz emitida por una bombilla cuando la corriente que fluye por ella aumenta?
63. En la figura se muestra el circuito en el interior de una lámpara incandescente. ¿Cuál de los arreglos de la batería iluminará la lámpara?



64. Tu amigo dice que una batería proporciona los electrones en un circuito eléctrico. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo? Defiende tu respuesta.
65. ¿Cuánta energía se suministra a cada coulomb de carga que pasa a través de una batería de 6 V?
66. ¿Un alambre portador de corriente está eléctricamente cargado debido a los electrones que se mueven en él?
67. Tu tutor te dice que un *ampere* y un *volt* miden en realidad la misma cosa y que la diferencia de términos sólo sirve para hacer que un concepto sencillo parezca confuso. ¿Por qué debes pensar en conseguirte otro tutor?
68. ¿En cuál de los circuitos mostrados existe una corriente para iluminar la bombilla?

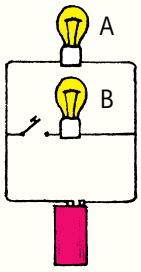



69. ¿Fluye más corriente hacia fuera de una batería que hacia dentro de ella? ¿Fluye más corriente hacia dentro de una bombilla que hacia fuera de ella? Explica.
70. Algo se "agota" en una batería que con el tiempo muere y ya no sirve. Un amigo dice que la corriente se agota. Otro amigo dice que la energía se agota. ¿Con quién, si alguno, estás de acuerdo y por qué?
71. Supón que dejas encendidas las luces de tu automóvil mientras ves una película. Cuando regresas, la batería está demasiado "débil" como para arrancar el automóvil. Un amigo arranca en frío tu automóvil con su batería y cables para batería. ¿Qué física ocurre aquí?
72. Tu amigo dice que, cuando arranques en frío una batería muerta, debes conectar tu batería viva en paralelo con la batería muerta, lo cual, en efecto, reemplaza la batería muerta. ¿Estás de acuerdo?
73. Un electrón que se mueve en un alambre choca en repetidas ocasiones con los átomos y recorre una distancia promedio entre colisiones llamada *trayectoria libre media*. Si la trayectoria libre media es menor en algunos metales, ¿qué puedes decir acerca de la resistencia de dichos metales? Para un conductor dado, ¿qué puede hacerse para alargar la trayectoria libre media?
74. ¿Por qué la corriente en una bombilla incandescente es mayor inmediatamente después de que se enciende que algunos momentos después? (Es por eso que las bombillas suelen quemarse justo cuando se encienden.)
75. Sólo un pequeño porcentaje de la energía eléctrica que alimenta una bombilla común se transforma en luz. ¿Qué ocurre con la energía restante?
76. ¿Por qué todas las lámparas fluorescentes compactas son más eficientes que las lámparas incandescentes?
77. ¿Por qué para transportar grandes corrientes generalmente se utilizan alambres gruesos en lugar de delgados?
78. ¿Por qué el filamento de una bombilla brilla, pero los alambres conectores no brillan?
79. ¿Una lámpara con un filamento grueso extraerá más corriente o menos corriente que una lámpara con un filamento delgado?
80. ¿Qué causa un choque eléctrico: la corriente o el voltaje?
81. Si una corriente de uno o dos décimos de ampere fluyera hacia una de tus manos y saliera por la otra, probablemente te electrocutarías. Pero si la misma corriente fluyera hacia tu mano y saliera por el codo de la misma mano, sobrevivirías aun cuando la corriente fuera tan grande como para quemar tu piel. Explica.
82. ¿Esperarías encontrar CD o CA en el filamento de una bombilla en tu casa? ¿En los faros de un automóvil?
83. ¿Los faros de los automóviles están alambrados en paralelo o en serie? ¿Cuál es tu evidencia?
84. A medida que se abren más filas en un restaurante de comida rápida, la resistencia al movimiento de las personas que intentan conseguir servicio se reduce. ¿En qué se parece esto a lo que ocurre cuando se agregan más ramas a un circuito en paralelo?
85. ¿Qué unidad significa (a) joule por coulomb, (b) coulomb por segundo, (c) watt·segundo?
86. ¿Qué es igual para un resistor de 10 Ω y uno de 20 Ω en serie en un circuito: la corriente o el voltaje?
87. ¿Qué es igual para un resistor de 10 Ω y uno de 20 Ω en paralelo en un circuito: la corriente o el voltaje?
88. Los efectos dañinos del choque eléctrico se deben a la cantidad de corriente que fluye en el cuerpo. ¿Por qué, entonces, uno ve señales donde se advierte "Peligro: Alto voltaje", en lugar de "Peligro: Alta corriente"?

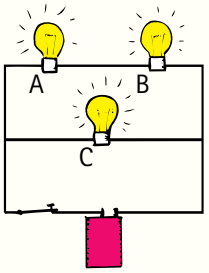
89. Comenta sobre la señal de advertencia que se muestra en el dibujo.

90. ¿La siguiente etiqueta en un producto doméstico debe causar preocupación? "Precaución: Este producto contiene pequeñas partículas con carga eléctrica que se mueven con rapideces que superan los 100,000,000 kilómetros por hora".

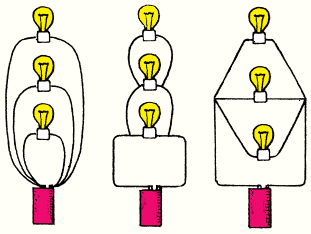
91. ¿Qué provocará menos daño: conectar una secadora de cabello de 100 V en un circuito de 220 V, o conectar una secadora de cabello de 220 V en un circuito de 110 V? Defiende tu respuesta.
92. ¿Por qué debe considerarse la envergadura de las aves cuando se determina el espaciamiento entre los alambres paralelos de una línea de transmisión eléctrica?
93. Estima el número de electrones que una compañía eléctrica suministra anualmente a los hogares de una ciudad típica de 40,000 personas.
94. Si los electrones fluyen con mucha lentitud por un circuito, ¿por qué no transcurre un tiempo considerablemente largo para que una lámpara brille cuando enciendes un interruptor distante?
95. ¿Por qué la rapidez de una señal eléctrica es mucho mayor que la rapidez del sonido?
96. Considera un par de bombillas de linterna conectadas a una batería. ¿Brillarán más si se conectan en serie o en paralelo? ¿La batería se agotará más rápido si las bombillas se conectan en serie o en paralelo?
97. ¿Qué ocurre con el brillo de la bombilla A cuando el interruptor se cierra y la bombilla B se enciende?




98. Si varias bombillas se conectan en serie a una batería, pueden sentirse calientes al tacto, pero no visiblemente brillantes. ¿Cuál es tu explicación?
99. En el circuito mostrado, ¿cómo se compara el brillo de las bombillas idénticas? ¿Cuál bombilla extrae más corriente? ¿Qué ocurrirá si la bombilla A se desenrosca? ¿Si la bombilla C se desenrosca?



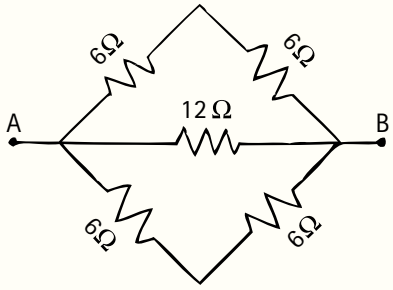

100. Conforme cada vez más bombillas se conectan en serie a una batería de linterna, ¿qué ocurre con el brillo de cada bombilla? Si supones que el calentamiento dentro de la batería es despreciable, ¿qué ocurre con el brillo de cada bombilla cuando cada vez más bombillas se conectan en paralelo?
101. ¿Qué cambios ocurren en la corriente de línea cuando se introducen más dispositivos en un circuito en serie? ¿En un circuito en paralelo? ¿Por qué tus respuestas son diferentes?
102. ¿Por qué no hay efectos en otras ramas en un circuito en paralelo cuando una rama del circuito se abre o se cierra?
103. Cuando un par de resistores idénticos se conectan en serie, ¿cuál de los siguientes es igual para ambos resistores: (a) el voltaje a través de cada uno, (b) la potencia disipada por cada uno, (c) la corriente a través de cada uno? ¿Alguna de tus respuestas cambia si los resistores son diferentes entre ellos?
104. Cuando dos resistores idénticos se conectan en paralelo, ¿cuál de los siguientes es igual para ambos resistores: (a) el voltaje a través de cada uno, (b) la potencia disipada por cada uno, (c) la corriente a través de cada uno? ¿Alguna de tus respuestas cambia si los resistores son diferentes entre sí?
105. Las baterías tienen una resistencia interna, la cual no siempre es despreciable. Se muestra cuando la corriente que suministra una batería aumenta, con lo cual el voltaje que suministra disminuye. Tomando en consideración la resistencia interna de la batería, ¿el brillo de muchas bombillas disminuirá cuando se conecten en paralelo? Defiende tu respuesta.
106. ¿Estos tres circuitos son equivalentes? ¿Por qué sí o por qué no?



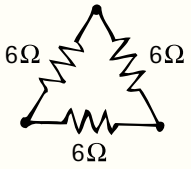
107. La Figura 23.19 muestra un fusible colocado en un circuito doméstico. ¿En qué otras ubicaciones de este circuito podría colocarse un fusible para que sea útil y sólo se funda si surge un problema?

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

108. Un detector de mentiras simple consiste en un circuito eléctrico que va generalmente de un dedo a otro. Un medidor sensible muestra la corriente que fluye cuando se aplica un pequeño voltaje. ¿Cómo esta técnica indica que una persona miente? (¿Y cuándo esta técnica no indica si una persona miente?)
109. Suele decirse que determinado resistor extrae cierta corriente. ¿Esto significa que el resistor "atrae" la corriente? Defiende tu respuesta.
110. Los faros de un automóvil disipan 40 W en luz baja y 50 W en luz alta. ¿En el filamento de una luz alta hay más o menos resistencia?
111. Para conectar un par de resistores, de modo que su resistencia combinada (equivalente) sea mayor que la resistencia de cualquiera de ellos, ¿debes conectarlos en serie o en paralelo?
112. Para conectar un par de resistores de modo que su resistencia combinada (equivalente) sea menor que la resistencia de cualquiera de ellos, ¿debes conectarlos en serie o en paralelo?
113. Si una bombilla incandescente que brilla se raja y le entra oxígeno, la bombilla momentáneamente brillará más antes de quemarse. Poner una corriente excesiva a través de la bombilla también la quemará. ¿Qué cambio físico ocurre cuando se quema una bombilla?
114. Tu amigo dice que la resistencia equivalente (combinada) de resistores conectados en serie siempre es mayor que la resistencia del resistor más grande. ¿Estás de acuerdo?
115. Tu amigo dice que la resistencia equivalente (combinada) de resistores conectados en paralelo siempre es menor que la resistencia del resistor más pequeño. ¿Estás de acuerdo?
116. Tu amigo experto en electrónica necesita un resistor de 20 Ω, pero sólo tiene resistores de 40 Ω. Te dice que puede combinarlos para producir un resistor de 20 Ω. ¿Cómo?
117. Tu amigo experto en electrónica necesita un resistor de 10 Ω, pero sólo tiene de 40 Ω. ¿Cómo puede combinarlos para producir una resistencia equivalente de 10 Ω?
118. ¿La resistencia de una bombilla de 100 W es mayor o menor que la resistencia de una bombilla de 60 W? Si supones que los filamentos en cada bombilla tienen igual longitud y están hechos del mismo material, ¿cuál bombilla tiene el filamento más grueso?
119. Si una bombilla de 60 W y una bombilla de 100 W se conectan en serie en un circuito, ¿a través de cuál bombilla habrá mayor caída de voltaje? ¿Y si se conectan en paralelo?
120. (a) ¿Qué resistor sería equivalente a los resistores en este arreglo? (b) Si a través de los puntos A y B se aplican 24 volts, ¿cuánta corriente habría en el circuito? (c) ¿Cuánta corriente habrá en el resistor de 12 ohm?




121. Tres resistores de 6 ohm están ordenados en un triángulo, como se muestra. Una fuente de voltaje de 12 V se conecta a través de uno de los resistores.



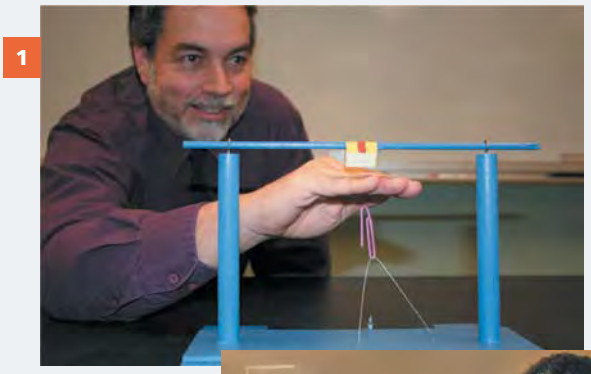

    a. ¿Cuánta corriente hay en dicho resistor?
    b. ¿Cuánta corriente hay en cada uno de los otros dos resistores?
    c. ¿Cuánta corriente hay en la fuente de voltaje?
    d. ¿Cuál es la resistencia equivalente del circuito (qué resistor individual, conectado a la fuente de voltaje, podría sustituir a los tres resistores)?

24

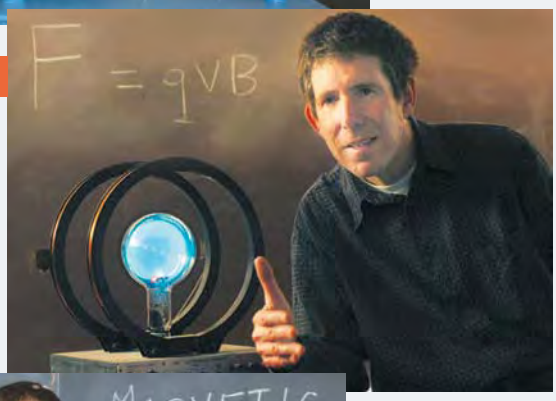
CAPÍTULO 24

# Magnetismo

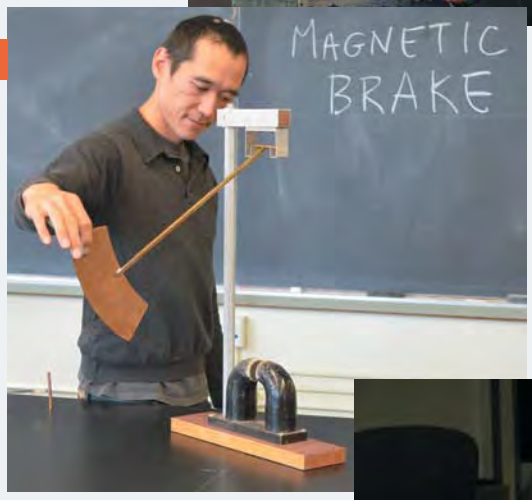

24.1 Magnetismo
24.2 Polos magnéticos
24.3 Campos magnéticos
24.4 Dominios magnéticos
24.5 Corrientes eléctricas y campos magnéticos
24.6 Electroimanes
24.7 Fuerzas magnéticas
24.8 El campo magnético de la Tierra
24.9 Biomagnetismo

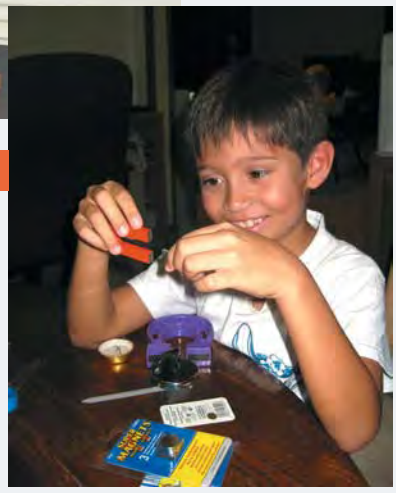
1




2



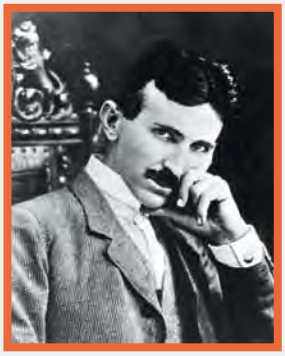

3



4

1 Fred Myers muestra que el campo magnético de un imán cerámico penetra su cuerpo y el recubrimiento plástico de un clip. 2 Ken Ganezer muestra el brillo azul-verdoso de los electrones que dan vueltas en las líneas de campo magnético en el interior de un tubo Thomson. 3 Cuando Fred Cauthen suelta la hoja de cobre, ¿por qué se detiene cuando comienza a balancearse entre los polos magnéticos? 4 William Davis, como la mayoría de los niños, está fascinado con los imanes.

En la época en la que el aceite de ballenas se utilizaba para encender lámparas y la iluminación eléctrica hacía su debut, una pregunta apremiante era cuál forma de energía alimentaría la iluminación eléctrica. La persona que respondió mejor dicha pregunta fue Nikola Tesla, un serbio que emigró a Estados Unidos procedente del imperio austriaco en 1884.



Tesla, ingeniero eléctrico, fue un inventor prolífico y un genio que hablaba siete idiomas. Cuando llegó a Estados Unidos no tenía más que una carta de recomendación de su exempleador, dirigida a Thomas Edison. La carta era breve: "Conozco dos grandes hombres, uno es usted y el otro es este joven". Edison contrató a Tesla para que trabajara en su empresa Edison Machine Works. Tesla pronto se dedicó a resolver los problemas más difíciles de la compañía. Trabajó día y noche en el rediseño de los ineficaces motores y generadores de Edison pensando en la espléndida bonificación que le habían prometido si lograba buenos resultados. Cuando la bonificación no se materializó, Tesla renunció. Entonces estuvo cavando zanjas durante poco tiempo, irónicamente, para la compañía de Edison.

La principal disputa entre Tesla y Edison fue acerca de si la potencia eléctrica debía transportarse mediante corriente directa o corriente alterna. Edison defendía la corriente directa, que no se transportaba bien a través de largas distancias. La corriente alterna de Tesla sí lo hacía. Edison se puso furioso con Tesla y emprendió una enérgica campaña en contra de la corriente alterna de Tesla. Los dos siguieron siendo acérrimos adversarios a lo largo de sus vidas. Pero Tesla prevaleció y formó su propia compañía, que condujo a muchas patentes que ayudaron a dotar de electricidad a ciudades e industrias modernas. Tesla fue homenajeado en reiteradas ocasiones y se le alabó como el santo patrono de la electricidad moderna.

En 1888 Tesla formó equipo con George Westinghouse, y juntos aprovecharon la energía de las Cataratas del Niágara para alumbrar la ciudad cercana de Buffalo. Para enviar la electricidad a través de distancias más grandes, Westinghouse perfeccionó un dispositivo llamado transformador (consulta el Capítulo 25). La potencia de las Cataratas del Niágara pronto llegó a la ciudad de Nueva York y más lejos. Los esfuerzos de Tesla y Westinghouse en verdad iluminaron el mundo.

## 24.1 Magnetismo

A los niños les fascinan los imanes, principalmente porque actúan a distancia. Incluso cuando tu mano se interpone entre ellos, actúan a distancia como lo muestra Fred Myers en la primera de las fotografías con las que inicia el capítulo. Del mismo modo, un neurocirujano puede guiar un perdigón por el tejido cerebral hasta tumores inoperables, colocar un catéter en su posición o implantar electrodos sin causar casi ningún daño al tejido cerebral. El uso de los imanes crece día con día.

El término *magnetismo* proviene del nombre Magnesia, un distrito costero de la antigua Tesalia, en Grecia, donde los griegos encontraron piedras extrañas hace más de 2,000 años. Estas piedras, llamadas *magnetitas*, tienen la asombrosa propiedad de atraer pedazos de hierro. Con los imanes se fabricaron primero brújulas, que los chinos utilizaban para navegar en el siglo XII.

En el siglo XVI, William Gilbert, médico de la reina Isabel, fabricó imanes artificiales al frotar pedazos de hierro contra magnetitas, y sugirió que una brújula siempre apuntaba al norte y al sur porque la Tierra tenía propiedades magnéticas. Después, en 1750, John Michell, físico y astrónomo inglés, descubrió que las fuerzas magnéticas disminuían con la distancia respecto de la fuente magnética, y sus resultados fueron confirmados por Charles Coulomb. Los temas de magnetismo y electricidad se desarrollaron casi independientemente uno del otro hasta 1820, cuando un físico danés llamado Hans Christian Oersted descubrió, en una demostración en su salón de clase, que una corriente eléctrica afecta una brújula magnética.[1] También observó evidencia confirmadora de que el magnetismo se relacionaba con la electricidad. Poco tiempo después, el físico francés Andre Marie Ampere propuso que las corrientes eléctricas eran la fuente de todos los fenómenos magnéticos.

**VIDEO: El descubrimiento de Oersted**

Se dicen muchas mentiras sobre el magnetismo, de ahí la necesidad de un *filtro de conocimiento* que indique la diferencia entre lo que es cierto y lo que no lo es. El mejor filtro de conocimiento jamás inventado es la ciencia.

[1]Uno sólo puede especular sobre la frecuencia con que tales relaciones se vuelven evidentes cuando "se supone que no deben ocurrir" y se descartan como "algo anda mal con el aparato". Sin embargo, Oersted tuvo la intuición —característica de un buen científico— para ver que la naturaleza revelaba otro de sus secretos.

En el Capítulo 22 se estudiaron las fuerzas que las partículas con carga eléctrica ejercen unas sobre otras: la fuerza entre cualesquiera dos partículas cargadas depende de la magnitud de la carga sobre cada una y de su distancia de separación, como lo especifica la ley de Coulomb. Pero la ley de Coulomb no es suficiente cuando las partículas cargadas se mueven unas con respecto a otras. La fuerza entre las partículas con carga eléctrica también depende, en una forma complicada, de su movimiento. Se descubre que, además de la *fuerza eléctrica*, hay una fuerza debida al movimiento de las partículas cargadas que se llama **fuerza magnética**. La fuente de la fuerza magnética es el movimiento de las partículas cargadas, generalmente electrones. Las fuerzas eléctrica y magnética en realidad son diferentes aspectos del mismo fenómeno de electromagnetismo.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Las fuerzas eléctricas y las fuerzas magnéticas dependen del movimiento?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Sólo la fuerza magnética necesita movimiento. Sigue leyendo.

## 24.2 Polos magnéticos

Las fuerzas que ejercen los imanes unos sobre otros son similares a las fuerzas eléctricas, porque ambas pueden atraer y repeler sin tocar, dependiendo de qué extremos de los imanes se mantengan juntos. También, al igual que las fuerzas eléctricas, la intensidad de su interacción depende de la distancia de separación entre los dos imanes. Mientras que la carga eléctrica es responsable de las fuerzas eléctricas, las regiones llamadas *polos magnéticos* originan las fuerzas magnéticas.

Si suspendes un imán de barra en su centro con un pedazo de cuerda, tendrás una brújula. Un extremo, llamado *polo que busca el norte*, apunta al norte, y el extremo opuesto, llamado *polo que busca el sur*, apunta al sur. Dicho de un modo más sencillo, se les llama *polos norte* y *sur*. Todos los imanes tienen tanto polo norte como polo sur (algunos tienen más de uno de ellos). Los imanes del refrigerador, populares en años recientes, tienen tiras delgadas de polos norte y sur alternados. Estos imanes son tan potentes que sostienen hojas de papel contra la puerta del refrigerador, pero tienen un alcance muy corto porque los polos norte y sur están juntos y se cancelan a distancias cortas. En un imán de barra simple, un solo polo norte y un solo polo sur se ubican en extremos opuestos. Un imán de herradura común es tan sólo un imán de barra que se dobló en forma de U. Sus polos también están en sus dos extremos (Figura 24.1).

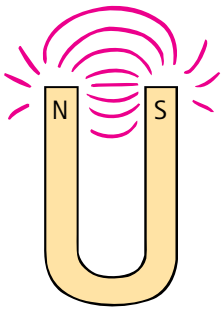



**FIGURA 24.1**
Un imán de herradura.

Cuando el polo norte de un imán se acerca al polo norte de otro imán, éstos se repelen.[2] Lo mismo sucede con un polo sur que se acerca a otro polo sur. Sin embargo, si polos opuestos se acercan, se atraen. Se descubre que:

**Polos iguales se repelen; polos opuestos se atraen.**

Esta regla es similar a la regla para las fuerzas entre cargas eléctricas, donde cargas iguales se repelen y cargas opuestas se atraen. Pero hay una diferencia muy importante entre los polos magnéticos y las cargas eléctricas. Mientras que las cargas eléctricas pueden aislarse, los polos magnéticos no pueden aislarse. Los electrones con carga negativa y los protones con carga positiva son entidades por sí mismas. Un grupo de electrones no necesita acompañarse de un grupo de protones, ni viceversa. Pero un polo magnético norte nunca existe sin la presencia de un polo sur, y viceversa.

Si los imanes no se pegan a la puerta de acero inoxidable de tu refrigerador, seguramente la puerta es una mezcla de acero y níquel. Pero los imanes se pegarán al acero inoxidable cuando esté hecho con cromo en lugar de níquel.

[2]La fuerza de la interacción entre los polos está dada por $F \sim \frac{p_1 p_2}{d^2}$, donde $p_1$ y $p_2$ representan las intensidades de los polos magnéticos y $d$ representa la distancia de separación entre los polos. Observa la semejanza de esta relación con la ley de Coulomb.

Si rompes un imán de barra a la mitad, cada mitad todavía actúa como un imán completo. Rompe los trozos de nuevo a la mitad y tendrás cuatro imanes completos. Puedes seguir rompiendo los trozos a la mitad y nunca aislarás un solo polo.[3] Aun cuando el pedazo sea del grosor de un átomo, habrá dos polos, lo cual sugiere que los átomos en sí mismos son imanes.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Todo imán necesariamente tiene un polo norte y uno sur?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Sí, así como toda moneda tiene dos lados, una "cara" y una "cruz". Algunos imanes "de truco" tienen más de un par de polos, pero, no obstante, los polos siempre ocurren en pares.

## 24.3 Campos magnéticos

Si esparces algunas limaduras de hierro sobre una hoja de papel colocada encima de un imán, verás que las limaduras trazan un patrón ordenado de líneas en torno al imán. El espacio alrededor del imán contiene un **campo magnético**. La forma del campo lo revelan las limaduras, que se alinean con las líneas del campo magnético que se extiende desde un polo y regresa al otro.

La dirección del campo afuera de un imán es del polo norte al polo sur. Donde las líneas están más juntas, el campo es más intenso. Las concentraciones de limaduras de hierro en los polos del imán de la Figura 24.2 muestran que la intensidad del campo magnético es mayor ahí. Si colocas otro imán o una pequeña brújula en cualquier parte del campo, sus polos se alinearán con el campo magnético.

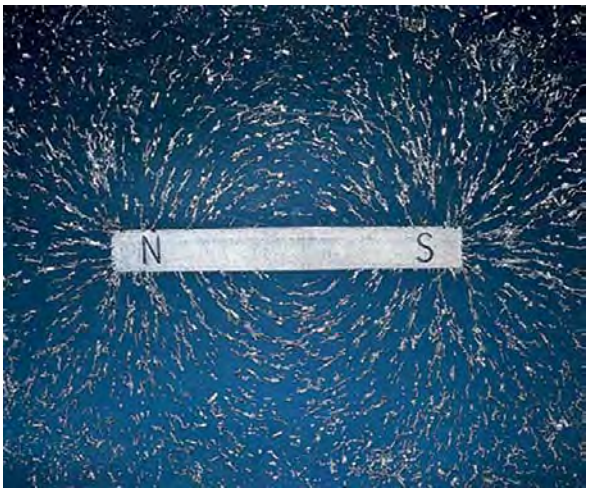



**FIGURA 24.2**
Vista superior de limaduras de hierro esparcidas alrededor de un imán que trazan un patrón de líneas de campo magnético. Es interesante que las líneas del campo magnético continúen en el interior del imán (no reveladas por las limaduras) y formen bucles cerrados.

El magnetismo está muy relacionado con la electricidad. Tal como una carga eléctrica está rodeada por un campo eléctrico, la misma carga también está rodeada por un campo magnético si ésta se encuentra en movimiento. Este campo magnético se debe a las "distorsiones" del campo eléctrico causadas por el movimiento y esto lo explicó Albert Einstein en 1905 en su teoría de la relatividad especial. En este texto no

**SCREENCAST: Magnetismo**

[3]Los físicos teóricos han especulado durante más de 75 años sobre la posible existencia de "cargas" magnéticas discretas, denominadas monopolos magnéticos. Estas pequeñas partículas portarían un solo polo magnético norte o un solo polo magnético sur, y serían las contrapartes de las cargas positiva y negativa en electricidad. Se han hecho varios intentos por encontrar los monopolos, pero ninguno ha resultado exitoso. Todo mundo sabe que los imanes siempre tienen al menos un polo norte y un polo sur.

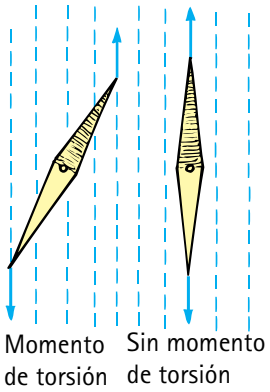


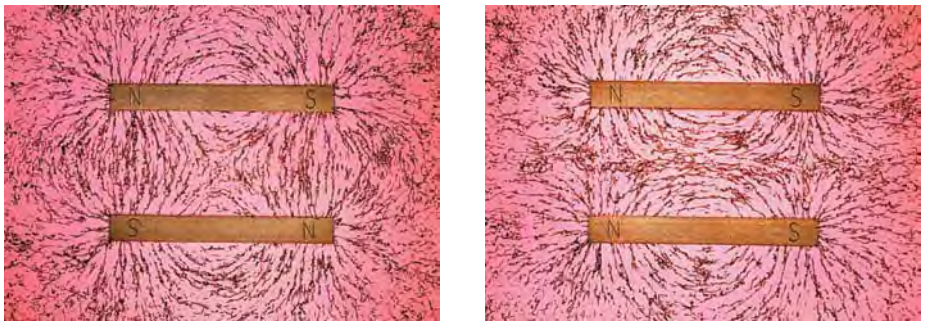

**FIGURA 24.3**
Cuando la aguja de la brújula no está alineada con el campo magnético (izquierda), las fuerzas sobre la aguja que se dirigen en sentido opuesto producen un par de momentos de torsión (llamados *torcas* o *pares*) que giran la aguja hasta alinearla (derecha).

se entrará en detalles, excepto para reconocer que un campo magnético es un subproducto relativista del campo eléctrico. Las partículas cargadas en movimiento tienen asociadas con ellas tanto un campo eléctrico como un campo magnético. Un campo magnético se produce por el movimiento de una carga eléctrica.[4]

Si el movimiento de las cargas eléctricas produce magnetismo, ¿dónde está este movimiento en un imán de barra común? La respuesta es: en los electrones de los átomos que constituyen el imán. Estos electrones están en movimiento constante. Dos tipos de movimiento electrónico contribuyen al magnetismo: la revolución del electrón y el espín del electrón. Los electrones se comportan como si giraran en torno al núcleo atómico y también alrededor de su propio eje como trompos. En casi todos los imanes comunes, el espín del electrón es el que más contribuye al magnetismo.

Todo electrón que gira es un pequeño imán. Un par de electrones que giran en la misma dirección constituyen un imán más fuerte. Sin embargo, un par de electrones que giran en direcciones contrarias trabajan uno contra el otro. Los campos magnéticos se cancelan. Es por esto que casi ninguna sustancia es imán. En la mayoría de los átomos, los diversos campos se cancelan entre sí porque los electrones giran en direcciones opuestas. Pero en materiales como el hierro, el níquel y el cobalto, los campos no se cancelan entre sí por completo. Por ende, cada átomo de hierro es un pequeño imán. Lo mismo sucede, aunque en menor medida, con los átomos de níquel y cobalto. La mayoría de los imanes comunes están hechos de aleaciones que contienen hierro, níquel y cobalto en varias proporciones.[5]

**FIGURA 24.4**
Patrones de campo magnético de un par de imanes. (a) Los polos opuestos están más cerca entre ellos, y (b) los polos iguales están más cerca entre ellos.




(a) (b)

**FIGURA 24.5**
Vista microscópica de los dominios magnéticos en un cristal de hierro. Las flechas azules que apuntan en diferentes direcciones indican que dichos dominios no están alineados.

## 24.4 Dominios magnéticos

El campo magnético de un átomo de hierro es tan intenso que las interacciones entre átomos adyacentes hacen que grandes grupos de ellos se alineen entre sí. Estos grupos de átomos alineados se llaman **dominios magnéticos**. Cada dominio está constituido por miles de millones de átomos alineados. Los dominios son microscópicos (Figura 24.5) y existen muchos de ellos en un cristal de hierro. De forma parecida a la alineación de átomos de hierro dentro de los dominios, los dominios también pueden alinearse entre sí.

[4]Es interesante que, dado que el movimiento es relativo, el campo magnético es relativo. Por ejemplo, cuando una carga se mueve hacia ti, existe un campo magnético asociado con la carga en movimiento. Pero si te mueves junto con la carga, de modo que no haya movimiento en relación a ti, descubrirás que no hay campo magnético asociado a la carga. El magnetismo es relativista. De hecho, Albert Einstein fue el primero en explicar esto cuando publicó su primer ensayo sobre la relatividad especial, "On the Electrodynamics of Moving Bodies" (Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento). (En los Capítulos 35 y 36 encontrarás más acerca de la relatividad.)

[5]El espín del electrón contribuye virtualmente a todas las propiedades magnéticas de los imanes hechos con aleaciones que contienen hierro, níquel, cobalto y aluminio. En los metales raros como el gadolinio, el movimiento orbital es más significativo.

Sin embargo, no todo pedazo de hierro es un imán. Esto es así porque los dominios en el hierro ordinario no están alineados. Piensa en un clavo de hierro común: los dominios en el clavo están orientados al azar. No obstante, muchos de ellos se inducen a alinearse cuando se acerca un imán. (Es interesante escuchar con un estetoscopio amplificador el traqueteo de los dominios que experimentan alineación en un pedazo de hierro cuando se aproxima un imán intenso.) Los dominios se alinean en forma muy parecida a como las cargas eléctricas en una hoja de papel se alinean en presencia de una barra con carga eléctrica. Cuando alejas el clavo del imán, el movimiento térmico ordinario hace que la mayoría o todos los dominios en el clavo regresen a su ordenamiento aleatorio. Sin embargo, si el campo del imán permanente es muy intenso, el clavo puede conservar cierto magnetismo permanente propio después de que los dos se hayan separado.

**FIGURA 24.6**
Wai Tsan Lee muestra clavos de hierro que se convierten en imanes inducidos.

Para fabricar imanes permanentes, sólo se colocan pedazos de hierro o ciertas aleaciones de hierro en campos magnéticos intensos. Las aleaciones de hierro difieren; el hierro blanco es más fácil de imantar que el acero. Es de utilidad golpear el hierro para sacudir cualquier dominio terco y que se alinee. Otra forma de hacer un imán permanente es golpear un trozo de hierro con un imán. El movimiento de golpeteo alinea los dominios en el hierro. Si un imán permanente se deja caer o se calienta, parte de los dominios salen de alineación y el imán se vuelve más débil.

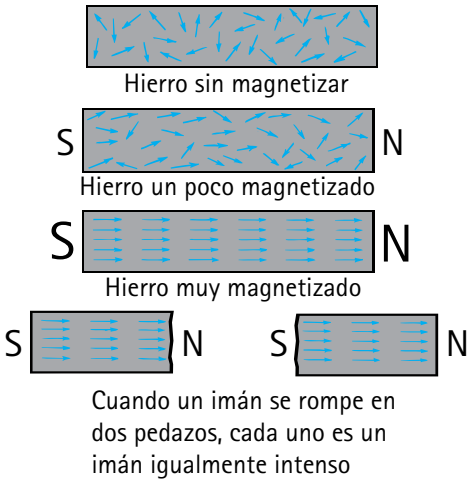



**FIGURA 24.7**
Pedazos de hierro en etapas sucesivas de magnetización. Las flechas representan dominios; la punta es un polo norte y la cola es un polo sur. Los polos de los dominios vecinos neutralizan sus efectos entre sí, excepto en los dos extremos de un pedazo de hierro.

Con frecuencia, las vacas tragan objetos metálicos que pueden perforarles el estómago. Es por ello que los ganaderos alimentan a las vacas con *imanes vacunos* (largos y estrechos imanes de alnico), que atraen las piezas metálicas y reducen la posibilidad de perforación estomacal.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Cómo es que un imán puede atraer un pedazo de hierro que no está magnetizado?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Los dominios en el pedazo no magnetizado de hierro se inducen a la alineación mediante el campo magnético del imán cercano. Observa la semejanza de esto con la Figura 22.13 del Capítulo 22. Al igual que los pedazos de papel que saltan hacia el peine, los pedazos de hierro saltarán hacia un imán intenso cuando se acerquen a él. Pero, a diferencia de los pedazos de papel, después no se repelen. ¿Puedes pensar en una razón por la que sucede esto?

**pti**

- La banda magnética de una tarjeta de crédito contiene millones de pequeños dominios magnéticos que se mantienen juntos mediante un adhesivo de resina. Los datos se codifican en código binario, donde los ceros y unos se distinguen por la frecuencia de inversiones de dominio. Es bastante sorprendente cuán rápido brinda tu nombre cuando un empleado barre tu tarjeta.

## 24.5 Corrientes eléctricas y campos magnéticos

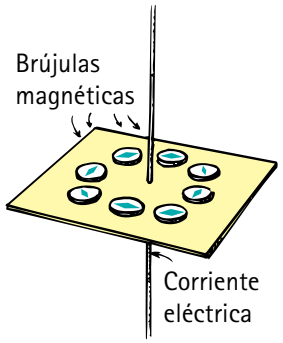


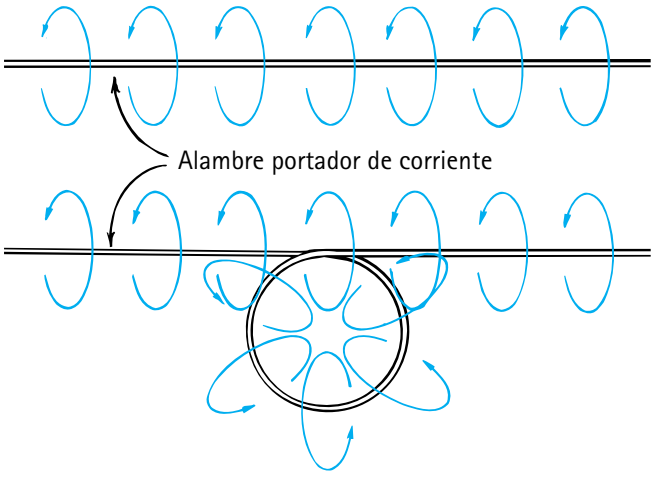

**FIGURA 24.8**
Las brújulas muestran la forma circular del campo magnético que rodea al alambre portador de corriente.

Dado que una carga en movimiento produce un campo magnético, se deduce que una corriente de cargas también produce un campo magnético. Puedes mostrar el campo magnético que rodea un conductor portador de corriente si colocas una distribución de brújulas alrededor de un alambre (Figura 24.8) y haces pasar una corriente por él. Las agujas de las brújulas se alinearán con el campo magnético producido por la corriente y mostrarán el campo como un patrón de círculos concéntricos alrededor del alambre. Cuando la corriente invierte su dirección, las agujas de las brújulas dan la vuelta, lo que demuestra que también cambia la dirección del campo magnético. Éste es el efecto que Oersted demostró por primera vez en su salón de clase.

Si el alambre se dobla en una espira, las líneas del campo magnético se amontonan dentro de la espira (Figura 24.9). Si el alambre se dobla en otra espira, que coincida con la primera, la concentración de las líneas de campo magnético dentro de las espiras se duplica. Se deduce que la intensidad del campo magnético en esta región aumenta con el número de espiras. La intensidad del campo magnético es considerable para una bobina portadora de corriente con muchas espiras.

La Figura 24.10c muestra la concentración de la intensidad del campo magnético para múltiples espiras portadoras de corriente. Estas espiras constituyen una bobina, que se conoce como solenoide. El campo total dentro del solenoide es igual a la suma de los campos debidos a cada espira de corriente.

**FIGURA 24.9**
Las líneas de campo magnético en torno a un alambre portador de corriente se amontonan cuando el alambre se dobla en una espira.




### PRACTICANDO LA FÍSICA

Casi todos los objetos de hierro que te rodean están magnetizados en cierta medida. Un archivero, un refrigerador e incluso las latas de alimentos de tu alacena tienen polos norte y sur inducidos por el campo magnético de la Tierra. Si acercas una brújula magnética a los objetos de hierro o acero de tu casa, descubrirás que el polo norte de la aguja de la brújula apunta hacia la parte superior de dichos objetos, y que el polo sur de la aguja de la brújula apunta a su parte inferior. Esto demuestra que los objetos son imanes, que tienen un polo sur en la parte superior y un polo norte en la parte inferior. ¡Voltea de cabeza las latas de alimento que estaban en una posición horizontal y observa cuántos días transcurren para que los polos se inviertan!

## 24.6 Electroimanes

Una bobina de alambre portadora de corriente es un **electroimán**. La intensidad de un electroimán aumenta con sólo incrementar la corriente que pasa por la bobina y el número de vueltas en la bobina. Los imanes industriales adquieren más intensidad cuando tienen dentro de la bobina un pedazo de hierro. Es común observar en los desguaces electroimanes tan poderosos que levantan automóviles. Los dominios magnéticos en los núcleos de hierro se inducen a alinearse, y se agregan al campo. En el caso de los electroimanes extremadamente potentes, como los utilizados para controlar haces de partículas cargadas en los aceleradores de alta energía, no se usa hierro porque, después de cierto punto, todos sus dominios se alinean. Se dice que el imán está saturado, y aumentar la corriente eléctrica que fluye alrededor del núcleo ya no afecta más la magnetización del núcleo y ya no se agrega al campo.

(a) (b) (c)

**FIGURA 24.10**
Limaduras de hierro esparcidas sobre papel revelan las configuraciones del campo magnético en torno a (a) un alambre portador de corriente, (b) una espira portadora de corriente y (c) una bobina de espiras portadora de corriente.

Los electroimanes no necesitan tener núcleos de hierro. Los electroimanes sin núcleo de hierro se utilizan en la transportación mediante levitación magnética, o "maglev" por *magnetic levitated*. La Figura 24.11 muestra un tren maglev, que no tiene motor diesel ni otro convencional. Los trenes maglev ya están en operación en China y Japón, y varios diseños todavía están en proceso de creación. En un diseño que ya es de uso comercial, la levitación se logra con bobinas magnéticas que corren a lo largo de la vía, llamada pista de guiado. Las bobinas repelen grandes imanes en la parte inferior del tren. Una vez que el tren levita algunos centímetros, se suministra energía a las bobinas dentro de las paredes de la pista de guiado, lo que impulsa al tren. Para lograr esto, se alterna continuamente la corriente eléctrica que alimenta a las bobinas, las que continuamente alternan su polaridad magnética. De esta forma, un campo magnético jala el vehículo hacia adelante, mientras que un campo magnético más atrás lo empuja hacia adelante. Los empujones y jalones alternados producen un empuje hacia adelante. Dado que los trenes maglev flotan sobre un colchón de aire, la fricción que acompaña a los trenes convencionales se elimina. Las rapideces maglev, de aproximadamente la mitad de la rapidez de los aviones comerciales, sólo está limitada por la fricción del aire y la comodidad de los pasajeros. Espera la expansión de esta tecnología en crecimiento.

**FIGURA 24.11**
Un vehículo de levitación magnética: un *magplane*. Mientras que los trenes convencionales vibran cuando viajan sobre las vías a rapideces altas, los magplanes pueden viajar sin vibración a rapideces altas porque levitan sobre la pista de guiado.

### Electroimanes superconductores

Los electroimanes más poderosos sin núcleos de hierro utilizan bobinas superconductoras a través de las cuales fluyen con facilidad grandes corrientes eléctricas. Recuerda del Capítulo 22 que en un superconductor no hay resistencia eléctrica que limite el flujo de carga eléctrica y, por tanto, no hay calentamiento, aun cuando la corriente es enorme. Los electroimanes que utilizan bobinas superconductoras producen campos

**FIGURA 24.12**
Un imán permanente levita sobre un superconductor porque su campo magnético no puede penetrar al material superconductor.

magnéticos muy poderosos, y lo hacen de un modo muy económico, porque no hay pérdidas por calor (aunque se usa energía para mantener fríos los superconductores). En el Gran Colisionador de Hadrones de Ginebra, Suiza, imanes superconductores guían partículas de alta energía alrededor de un acelerador con más de 27.3 kilómetros (17 millas) de circunferencia. En los hospitales se usan imanes superconductores en los dispositivos para obtener imágenes por resonancia magnética (IRM).

Sean superconductores o no lo sean, los electroimanes son parte de la vida cotidiana. Se encuentran en los sistemas de sonido, en los motores eléctricos, en los automóviles e incluso en los sistemas de reciclado y reducción de basura para retirar fragmentos metálicos. ¡Vivan los electroimanes!

## 24.7 Fuerzas magnéticas

### Sobre las partículas cargadas en movimiento

Una partícula cargada en reposo no interactuará con un campo magnético estático. Pero si se mueve en un campo magnético la partícula cargada, el carácter magnético de una carga en movimiento se vuelve evidente. Experimenta una fuerza de deflexión.[6] La fuerza es más grande cuando la partícula se mueve en una dirección perpendicular a las líneas del campo magnético. En otros ángulos, la fuerza es menor y se vuelve cero cuando las partículas se mueven paralelas a las líneas del campo. En cualquier caso, la dirección de la fuerza siempre es perpendicular a las líneas del campo magnético y a la velocidad de la partícula cargada (Figura 24.13). De modo que una partícula cargada en movimiento se desvía cuando cruza un campo magnético, pero cuando viaja paralela al campo, no ocurre desviación.

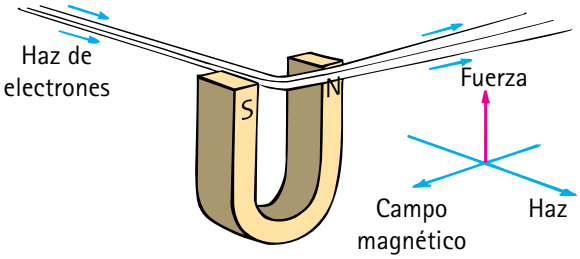



**FIGURA 24.13**
Un haz de electrones se desvía mediante un campo magnético.

Esta fuerza de deflexión es muy diferente de las fuerzas que ocurren en otras interacciones, como las fuerzas gravitacionales entre masas, las fuerzas eléctricas entre cargas y las fuerzas magnéticas entre polos magnéticos. La fuerza que actúa sobre una partícula cargada en movimiento no actúa a lo largo de la línea que une las fuentes de interacción sino, en vez de ello, actúa perpendicularmente tanto al campo magnético como al haz de electrones.

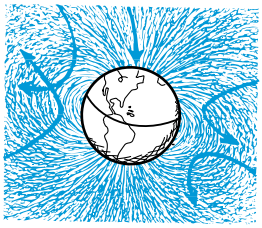


**FIGURA 24.14**
El campo magnético de la Tierra desvía muchas partículas cargadas que constituyen la radiación cósmica.

La humanidad es afortunada de que las partículas cargadas se desvíen mediante campos magnéticos. Las partículas cargadas en los rayos cósmicos se desvían gracias al campo magnético de la Tierra. Aunque la atmósfera de la Tierra absorbe la mayor parte de ellas, la intensidad de los rayos cósmicos en la superficie de la Tierra sería mucho mayor sin el campo magnético protector de la Tierra.

### Sobre los alambres portadores de corriente

La simple lógica indica que, si una partícula cargada que se mueve a través de un campo magnético experimenta una fuerza de deflexión, entonces una corriente de partículas cargadas que se mueven a través de un campo magnético también experimenta una fuerza de deflexión. Si las partículas están atrapadas dentro de un alambre cuando responden a la fuerza de deflexión, el alambre también será empujado (Figura 24.15).

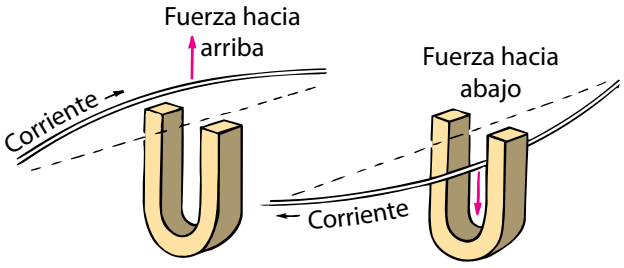


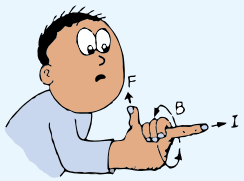

**FIGURA 24.15**
Un alambre portador de corriente experimenta una fuerza en un campo magnético. (¿Puedes ver que esto es continuación de lo que ocurre en la Figura 24.13?)

[6]Cuando partículas con carga eléctrica $q$ y velocidad $v$ se mueven perpendicularmente a través de un campo magnético con intensidad $B$, la fuerza $F$ sobre cada partícula es tan sólo el producto de tres variables: $F = qvB$. Para ángulos no perpendiculares, $v$ en esta relación debe ser el componente de velocidad perpendicular a $B$.

Si se invierte la dirección de la corriente, la fuerza de deflexión actúa en la dirección contraria. La fuerza es más intensa cuando la corriente es perpendicular a las líneas de campo magnético. La dirección de la fuerza no es a lo largo de las líneas de campo magnético o a lo largo de la dirección de la corriente. La fuerza es perpendicular tanto a las líneas del campo como a la corriente. Es una fuerza lateral.

Se observa que, así como un alambre portador de corriente desviará un imán tal como la aguja de una brújula (de nuevo, como lo descubrió Oersted), entonces, un imán desviará un alambre portador de corriente. El descubrimiento de estos vínculos complementarios entre electricidad y magnetismo creó mucho entusiasmo, y las personas comenzaron a aprovechar casi de inmediato la fuerza electromagnética para propósitos útiles —con gran sensibilidad en los medidores eléctricos y con gran fuerza en los motores eléctricos—.

En el complemento de Resolución de problemas, ¡aprenderás la regla "simple" de la mano derecha!




**PUNTO DE CONTROL**

**¿Qué ley de la física te indica que, si un alambre portador de corriente produce una fuerza sobre un imán, entonces un imán debe producir una fuerza sobre un alambre portador de corriente?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La tercera ley de Newton, que se aplica a *todas* las fuerzas de la naturaleza.

**VIDEO: Fuerzas magnéticas sobre alambres portadores de corriente**

## Medidores eléctricos

El medidor más simple para detectar corriente eléctrica es un imán que puede girar con libertad: una brújula. El siguiente medidor más simple es una brújula en una bobina de alambres (Figura 24.16). Cuando una corriente eléctrica pasa por la bobina, cada espira produce su propio efecto sobre la aguja, de modo que puede detectarse una corriente muy pequeña. Un instrumento sensible que indica la corriente se llama *galvanómetro*, llamado así en honor a Luigi Galvani, quien, en el siglo XVIII, descubrió que distintos metales provocaban el retorcimiento de la pata de una rana que estaba disecando.

El azaroso descubrimiento de Galvani de la rana que se retorcía lo condujo a inventar la celda química y la batería. La próxima vez que levantes un cubo galvanizado, piensa en Luigi Galvani en su laboratorio de anatomía.

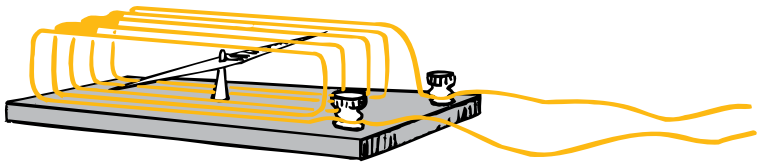


**FIGURA 24.16**
Un galvanómetro muy simple.

En la Figura 24.17 se muestra el diseño de un galvanómetro común. Éste emplea muchas espiras de alambre y, por tanto, es muy sensible. La bobina está montada y dispuesta para moverse, y el imán se mantiene estacionario. La bobina gira contra un resorte, de modo que cuanto más grande sea la corriente en sus devanados, mayor será su deflexión. Un galvanómetro puede calibrarse para medir corriente (amperes), en cuyo caso se llama *amperímetro*. O puede calibrarse para medir potencial eléctrico (volts), en cuyo caso se llama *voltímetro*.

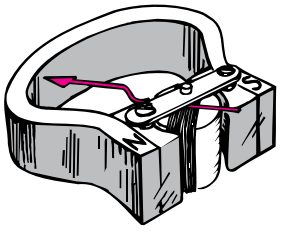


**FIGURA 24.17**
Diseño de un galvanómetro común.

**FIGURA 24.18**
Tanto el amperímetro como el voltímetro son básicamente galvanómetros. (La resistencia eléctrica del instrumento se hace muy baja para el amperímetro y muy alta para el voltímetro.)

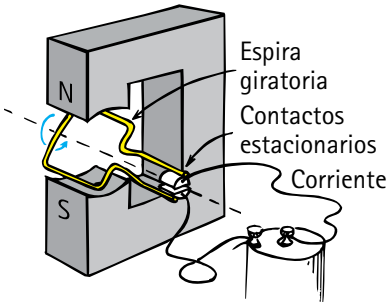



**FIGURA 24.19**
Un motor eléctrico simplificado.

## Motores eléctricos

Si el diseño del galvanómetro se modifica un poco, de modo que la deflexión realice una rotación completa en lugar de una parcial, se tiene un *motor eléctrico*. La principal diferencia es que, en un motor, la corriente se hace cambiar de dirección cada vez que la bobina realiza media rotación. Después de forzarse a girar media rotación, la bobina continúa en movimiento justo a tiempo para que la corriente se invierta, con lo cual, en lugar de que la bobina invierta su dirección, es forzada a continuar otra media rotación en la misma dirección. Esto ocurre de forma cíclica para producir una rotación continua, la cual se ha aprovechado para hacer funcionar relojes y dispositivos electrónicos, así como para levantar cargas pesadas.

En la Figura 24.19 puedes ver el principio del motor eléctrico en un dibujo sencillo. Un imán permanente produce un campo magnético en una región en la que una espira rectangular de alambre está montada para girar en torno al eje punteado que se muestra. La corriente en la espira cambia de dirección con cada media vuelta y ocasiona una rotación continua.

Cualquier corriente en la espira se mueve en una dirección en el lado superior de la espira y en la dirección opuesta en el lado inferior (puesto que las cargas que fluyen hacia un extremo de la espira deben fluir hacia fuera del otro extremo). Si el lado superior de la espira se fuerza hacia la izquierda por el campo magnético, el lado inferior se fuerza hacia la derecha, como si fuese un galvanómetro. Pero, a diferencia de lo que sucede con un galvanómetro, la corriente en un motor se invierte durante cada media revolución mediante contactos estacionarios en el eje. Las partes del alambre que giran y cepillan contra dichos contactos se llaman *escobillas*. De esta forma, la corriente en la espira alterna de modo que las fuerzas sobre las regiones superior e inferior no cambian de dirección mientras la espira gira. La rotación es continua en tanto se suministre corriente.

Un motor y un generador en realidad son el mismo dispositivo, con la entrada y la salida invertidos. El dispositivo eléctrico en un automóvil híbrido es una combinación motor/generador.

Aquí sólo se describe un motor CD muy simple. Para fabricar motores más grandes, con CD o CA, por lo general se sustituye el imán permanente con un electroimán que es energizado mediante la fuente de poder. Desde luego, se utiliza más de una sola espira. Muchas espiras de alambre se devanan en torno a un cilindro de hierro, llamado *armadura*, que entonces gira cuando el alambre porta corriente.

La llegada de los motores eléctricos puso fin a muchos trabajos pesados realizados por seres humanos y animales en muchas partes del mundo. Los motores eléctricos han cambiado enormemente la vida de las personas.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Cuál es la principal semejanza entre un galvanómetro y un motor eléctrico simple? ¿Cuál es la principal diferencia?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTAS**

En ambos, las bobinas se colocan en un campo magnético. Una fuerza produce rotación cuando pasa corriente por las bobinas. La principal diferencia es que la máxima rotación de la bobina en un galvanómetro es una media vuelta, en tanto que, en un motor, la bobina (enrollada sobre una armadura) gira muchas vueltas completas, lo que se logra al alternar la corriente con cada media vuelta de la armadura.

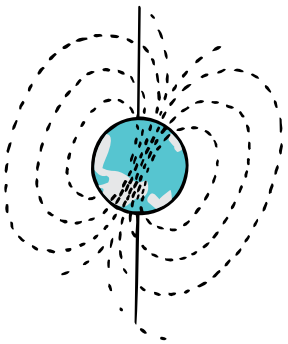


**FIGURA 24.20**
La Tierra es un imán.

## 24.8 El campo magnético de la Tierra

Un imán suspendido o brújula apunta hacia el norte porque la Tierra misma es un imán enorme. La brújula se alinea con el campo magnético de la Tierra. Sin embargo, los polos magnéticos de la Tierra no coinciden con los polos geográficos; de hecho, los polos magnético y geográfico están muy separados (Figura 24.20). El polo magnético en el hemisferio norte, por ejemplo, ahora se ubica a casi 1,800 kilómetros del polo geográfico, en alguna parte de la región de la bahía de Hudson del norte de Canadá. El

otro polo se ubica al sur de Australia. Esto significa que las brújulas por lo general no apuntan hacia el norte verdadero. La discrepancia entre la orientación de una brújula y el norte verdadero se conoce como *declinación magnética*.

No se sabe con exactitud por qué la Tierra es un imán. La configuración del campo magnético de la Tierra es como el de un intenso imán de barra colocado cerca del centro de la Tierra. Pero la Tierra no es un pedazo magnetizado de hierro, como un imán de barra. Simplemente está demasiado caliente para que cada átomo se mantenga en la orientación apropiada. De modo que es probable que la explicación tenga que ver con corrientes eléctricas en lo profundo de su interior. Unos 2,000 kilómetros por debajo del manto rocoso exterior de la Tierra (que tiene un grosor de casi 3,000 kilómetros) yace la parte fundida que rodea el centro sólido. La mayoría de los científicos que estudian la Tierra consideran que hay cargas en movimiento que dan vueltas dentro de la parte fundida de la Tierra y crean el campo magnético. Algunos científicos especulan que las corrientes eléctricas son resultado de corrientes de convección (calor que sube desde el núcleo central; Figura 24.21) y que tales corrientes de convección, combinadas con los efectos rotacionales de la Tierra, producen el campo magnético de la Tierra. Debido al gran tamaño de la Tierra, la rapidez de las cargas en movimiento sólo necesita aproximadamente un milímetro por segundo para provocar el campo. Hay que estudiar más para encontrar una explicación más firme.

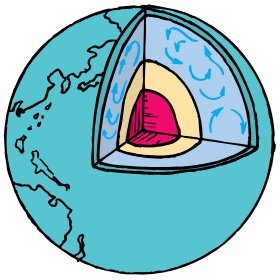


**FIGURA 24.21**
Las corrientes de convección en las partes fundidas del interior de la Tierra pueden impulsar corrientes eléctricas que produzcan el campo magnético de la Tierra.

Cualquiera que sea la causa, el campo magnético de la Tierra no es estable; ha variado con el transcurso del tiempo geológico. La evidencia de esto proviene del análisis de las propiedades magnéticas de los estratos rocosos. Los átomos de hierro en un estado fundido están desorientados debido al movimiento térmico, pero una predominancia leve de los átomos de hierro se alinea con el campo magnético de la Tierra. Cuando ocurren enfriamiento y solidificación, esta predominancia registra la dirección del campo magnético de la Tierra en las rocas ígneas resultantes. El proceso es similar con las rocas sedimentarias, donde los dominios magnéticos en granos de hierro que se asientan en los sedimentos tienden a alinearse con el campo magnético de la Tierra y a quedar grabados en la roca que forman. El leve magnetismo que resulta puede medirse con instrumentos sensibles. A medida que se hacen pruebas con las muestras de roca de diferentes estratos formados a lo largo del tiempo geológico, se pueden realizar gráficas del campo magnético de la Tierra para diferentes periodos. Estos datos muestran que ha habido épocas en las que el campo magnético de la Tierra ha disminuido hasta cero, seguido por una inversión de los polos. En los pasados 5 millones de años han ocurrido más de 20 inversiones. La más reciente ocurrió hace 700,000 años. Hubo inversiones previas hace 870,000 y 950,000 años. Estudios de los sedimentos de las profundidades marinas indican que el campo virtualmente desapareció durante 10,000 a 20,000 años hace más de 1 millón de años. No es posible predecir cuándo ocurrirá la siguiente inversión porque la secuencia de inversión no es regular. Pero existe una pista en las mediciones recientes que muestran una reducción de más del 5% de la intensidad del campo magnético de la Tierra en los últimos 100 años. Si este cambio se mantiene, podría tenerse otra inversión dentro de 2,000 años.

Al igual que la cinta de un magnetófono, la historia del fondo marino se conserva en un registro magnético.

La inversión de los polos magnéticos no es exclusiva de la Tierra. El campo magnético del Sol se invierte en forma regular, con un periodo de 22 años. Este ciclo magnético de 22 años se ha vinculado, por evidencias en los anillos de los árboles, con los periodos de sequía de la Tierra. Es muy interesante que el muy conocido ciclo de 11 años de las manchas solares esté a la mitad del tiempo durante el cual el Sol gradualmente invierte su polaridad magnética.

Los vientos iónicos variables en la atmósfera terrestre provocan fluctuaciones más rápidas, pero mucho más pequeñas, en el campo magnético de la Tierra. Los iones en esta región se producen por las interacciones energéticas de los rayos ultravioleta y los rayos X solares con los átomos atmosféricos. El movimiento de estos iones produce una pequeña pero importante parte del campo magnético de la Tierra. Al igual que las capas inferiores de aire, la ionosfera es agitada por vientos. Las variaciones de estos vientos ocasionan casi todas las fluctuaciones rápidas del campo magnético de la Tierra. Es interesante que los vientos solares que llegan a la Tierra choquen con el campo magnético de la Tierra en lugar de chocar con la atmósfera.

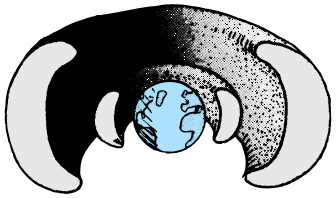


**FIGURA 24.22**
Sección transversal de los cinturones de radiación Van Allen, que aquí se muestran sin la distorsión producida por el viento solar.

**FIGURA 24.23**
Las auroras boreales en el cielo son causadas por partículas cargadas en los cinturones de Van Allen que golpean moléculas atmosféricas.

En ciencia no cabe la certidumbre. Los científicos entienden que todo conocimiento es provisional y está sujeto a revisión. ¿Cuántos de los crímenes y crueldades en la historia han sido perpetrados por personas que tenían la certeza de saber la verdad?

## Rayos cósmicos

El Universo es una galería de tiro de partículas cargadas. Se llaman **rayos cósmicos** y consisten en protones, partículas alfa y otros núcleos atómicos desprendidos de electrones, así como de electrones de alta energía. Los protones pueden ser restos del Big Bang; los núcleos más pesados probablemente se evaporaron de estrellas que explotaron. En cualquier caso, viajan a través del espacio con rapideces fantásticas y constituyen la radiación cósmica que es peligrosa para los astronautas. Esta radiación se intensifica cuando el Sol está activo y aporta partículas energéticas adicionales. Los rayos cósmicos también son peligrosos para la instrumentación electrónica en el espacio; impactos de núcleos de rayos cósmicos pueden hacer que bits de memoria de cómputo se "inviertan" o que fallen pequeños microcircuitos. Por fortuna para quienes están sobre la superficie de la Tierra, la mayor parte de estas partículas cargadas no llegan a la superficie debido al grosor de la atmósfera. Los rayos cósmicos también son desviados por el campo magnético de la Tierra. Algunos de ellos quedan atrapados en los confines externos del campo magnético de la Tierra y constituyen los cinturones de radiación Van Allen (Figura 24.22).

Los cinturones de radiación Van Allen consisten en dos anillos con forma de dona que rodean la Tierra, llamados así en honor de James A. Belts, quien sugirió su existencia por datos recopilados por el satélite estadounidense *Explorer I* en 1958.[7] El anillo interior se centra aproximadamente a 3,200 kilómetros sobre la superficie terrestre, y el anillo exterior, que es una dona más grande y más ancha, se centra aproximadamente a 16,000 kilómetros sobre la superficie. Los astronautas orbitan a distancias seguras muy por abajo de estos cinturones de radiación. Es probable que la mayor parte de las partículas cargadas (protones y electrones) atrapadas en el cinturón exterior provengan del Sol. Las tormentas en el Sol arrojan partículas cargadas en grandes fuentes, muchas de las cuales pasan cerca de la Tierra y quedan atrapadas por su campo magnético. Las partículas atrapadas siguen rutas en espiral alrededor de las líneas de campo magnético de la Tierra y rebotan entre los polos magnéticos de la Tierra muy por arriba de la atmósfera. Las perturbaciones en el campo de la Tierra con frecuencia permiten que los iones caigan hacia la atmósfera, lo que produce que brillen como una lámpara fluorescente. Esta es la hermosa *aurora boreal* (o luces del norte); en el hemisferio sur, es la *aurora austral.*

Es probable que las partículas atrapadas en el cinturón interior se hayan originado en la atmósfera de la Tierra. Este cinturón ganó electrones adicionales libres con las explosiones de la bomba de hidrógeno a gran altitud en 1962.

A pesar del campo magnético protector de la Tierra, muchos rayos cósmicos "secundarios" llegan a la superficie de la Tierra.[8] Estas son partículas creadas cuando los rayos cósmicos "primarios" —los provenientes del espacio exterior— golpean núcleos atómicos en lo alto de la atmósfera. El bombardeo de rayos cósmicos es mayor en los polos magnéticos porque las partículas cargadas que golpean la Tierra no viajan *a través* de las líneas de campo magnético sino, más bien, *a lo largo* de las líneas de campo y no se desvían. El bombardeo de rayos cósmicos disminuye lejos de los polos y es más pequeño en las regiones ecuatoriales. A latitudes medias, alrededor de cinco partículas golpean cada centímetro cuadrado a cada minuto a nivel del mar; este número aumenta rápidamente con la altitud. De modo que hay rayos cósmicos que penetran tu cuerpo mientras lees esto, ¡y aun cuando no leas esto!

[7]En realidad, humor aparte, el nombre es James A. Van Allen (con su autorización).

[8]Algunos científicos biológicos especulan que los cambios magnéticos de la Tierra tuvieron una función muy importante en la evolución de las formas de vida. Una hipótesis es que, durante las primeras fases de la vida primitiva, el campo magnético de la Tierra era tan intenso que protegía las delicadas formas de vida contra las partículas cargadas con alta energía. Pero, durante periodos de intensidad cero, la radiación cósmica y el desbordamiento de los cinturones Van Allen aumentaron la tasa de mutación de las formas de vida más resistentes, nada diferente de las mutaciones producidas por los rayos X en los famosos estudios de herencia de las moscas de la fruta. Las coincidencias entre las fechas en que aumentaron los cambios de vida y las fechas de las inversiones de los polos magnéticos en los últimos millones de años brindan sustento a esta hipótesis.

## 24.9 Biomagnetismo

Ciertas bacterias producen biológicamente granos de magnetita (un compuesto equivalente a las vetas de hierro) de un solo dominio que juntan para formar brújulas internas. Luego utilizan estas brújulas para detectar las inclinaciones del campo magnético de la Tierra. Dotados con un sentido de dirección, los microorganismos son capaces de ubicar suministros de alimentos. Es sorprendente que estas bacterias que viven al sur del ecuador construyan los mismos imanes de un solo dominio que sus contrapartes que viven al norte del ecuador, ¡pero los alinean en la dirección contraria para que coincidan con el campo magnético en dirección opuesta en el hemisferio sur!

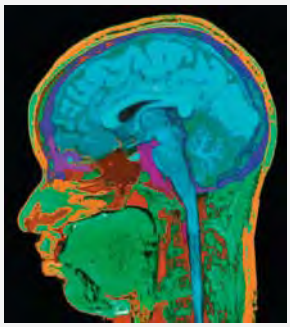
**FIGURA 24.24**
Estas bacterias acuáticas flotantes no pueden percibir arriba y abajo mediante la gravedad. En vez de ello, se orientan con el campo magnético de la Tierra gracias a sus "brújulas" internas.

Las bacterias no son los únicos organismos vivos con brújulas magnéticas internas. Las palomas tienen imanes de magnetita con dominios múltiples dentro de sus cráneos, que están conectados mediante un gran número de nervios al cerebro de la paloma. Las palomas tienen un sentido magnético: no sólo pueden discernir direcciones longitudinales a lo largo del campo magnético de la Tierra, sino que también pueden detectar la latitud mediante las inclinaciones del campo de la Tierra. El material magnético también se encuentra en los abdómenes de las abejas, en cuyo comportamiento influyen pequeños campos magnéticos. Algunas avispas, mariposas monarca, tortugas marinas y peces se unen a las clasificaciones de criaturas que tienen un sentido magnético. Cristales de magnetita que recuerdan a los cristales observados en las bacterias magnéticas también se han encontrado en los cerebros humanos. Nadie sabe si guardan relación con las sensaciones humanas. Al igual que las criaturas mencionadas antes, es posible que los seres humanos compartan un sentido magnético común.

### IRM: IMÁGENES POR RESONANCIA MAGNÉTICA

Las imágenes por resonancia magnética (IRM) constituyen una forma no invasiva de producir imágenes de alta resolución de los tejidos dentro del cuerpo. Bobinas superconductoras producen un intenso campo magnético hasta 60,000 veces más intenso que el campo magnético de la Tierra, que se utiliza para alinear los protones de los átomos de hidrógeno en el cuerpo del paciente.

Al igual que los electrones, los protones tienen una propiedad de "espín", de modo que se alinearán con un campo magnético. A diferencia de la aguja de una brújula que se alinea con el campo magnético de la Tierra, el eje del protón bambolea en torno al campo magnético aplicado. Los protones bamboleantes son golpeados por una ráfaga de ondas de radio ajustadas para empujar el eje de giro de los protones en sentido lateral, de forma que quede perpendicular al campo magnético aplicado. Cuando las ondas de radio pasan y los protones regresan con rapidez a su patrón de bamboleo, emiten débiles señales electromagnéticas cuyas frecuencias dependen un poco del entorno químico en el cual residen los protones. Las señales, que se detectan con sensores, se analizan con una computadora para revelar las densidades variables de los átomos de hidrógeno en el cuerpo y sus interacciones con el tejido circundante. Las imágenes distinguen con claridad entre líquido y hueso.



Es interesante observar que las IRM antes se llamaban IRMN (imágenes por resonancia magnética nuclear) porque los núcleos de hidrógeno resuenan con los campos aplicados. Sin embargo, debido a la fobia de la gente por cualquier cosa "nuclear", los aparatos ahora se llaman escáneres IRM. ¡Dile a tus amigos fóbicos que todos los átomos de su cuerpo contienen un núcleo!

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Fuerza magnética.** (1) Entre imanes, es la atracción mutua de polos magnéticos diferentes y la repulsión entre polos magnéticos iguales. (2) Entre un campo magnético y una partícula cargada en movimiento, es una fuerza de deflexión debida al movimiento de la partícula: la fuerza de deflexión es perpendicular a la velocidad de las partículas y perpendicular a las líneas de campo magnético. Esta fuerza es mayor cuando la partícula cargada se mueve perpendicular a las líneas de campo y es menor (cero) cuando se mueve paralela a las líneas de campo.

**Campo magnético.** La región de influencia magnética alrededor de un polo magnético o una partícula cargada en movimiento.

**Dominios magnéticos.** Regiones agrupadas de átomos magnéticos alineados. Cuando estas regiones se alinean unas con otras, la sustancia que las contiene es un imán.

**Electroimán.** Imán cuyo campo se produce mediante una corriente eléctrica. Por lo general tiene forma de una bobina de alambre con un pedazo de hierro en el interior de la bobina.

**Rayos cósmicos.** Partículas de gran rapidez que viajan por todo el universo.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 24.1 Magnetismo

1. ¿Quién, y en qué contexto, descubrió la relación entre la electricidad y el magnetismo?
2. La fuerza entre partículas con carga eléctrica depende de la magnitud de cada carga, su distancia de separación, ¿y qué más?
3. ¿Cuál es la fuente de la fuerza magnética?

### 24.2 Polos magnéticos

4. ¿La regla para la interacción entre polos magnéticos es similar a la regla para la interacción entre partículas con carga eléctrica?
5. ¿En qué forma los polos magnéticos son muy diferentes de las cargas eléctricas?

### 24.3 Campos magnéticos

6. ¿Cómo se relaciona la intensidad del campo magnético con la cercanía de las líneas de campo magnético en torno a un imán de barra?
7. ¿Qué produce un campo magnético?
8. ¿Cuáles dos clases de movimiento rotacional parecen tener los electrones en un átomo?

### 24.4 Dominios magnéticos

9. ¿Qué es un dominio magnético?
10. A nivel microscópico, ¿cuál es la diferencia entre un clavo de hierro no magnetizado y un clavo de hierro magnetizado?
11. ¿Por qué el hierro es magnético y la madera no lo es?
12. ¿Por qué soltar un imán de hierro sobre una acera de concreto lo convertirá en un imán más débil?

### 24.5 Corrientes eléctricas y campos magnéticos

13. En el Capítulo 22 aprendiste que la dirección del campo eléctrico en torno a una carga puntual es radial a la carga. ¿Cuál es la dirección del campo magnético que rodea un alambre portador de corriente?
14. ¿Qué ocurre con la dirección del campo magnético alrededor de una corriente eléctrica cuando la dirección de la corriente se invierte?
15. ¿Por qué la intensidad del campo magnético es mayor dentro de una espira de alambre portadora de corriente que alrededor de una sección recta de alambre?

### 24.6 Electroimanes

16. ¿Por qué un pedazo de hierro en una espira portadora de corriente aumenta la intensidad del campo magnético?
17. ¿Por qué los campos magnéticos de los imanes superconductores con frecuencia son más intensos que los de los imanes convencionales?

### 24.7 Fuerzas magnéticas

18. Cierto o falso: una partícula cargada debe moverse en un campo magnético estacionario para que una fuerza debida al campo actúe sobre ella.
19. ¿En qué dirección en relación a un campo magnético se mueve una partícula cargada para experimentar máxima fuerza de deflexión? ¿Mínima fuerza de deflexión?
20. ¿Qué efecto tiene el campo magnético de la Tierra sobre la intensidad de los rayos cósmicos que golpean la superficie de la Tierra?
21. ¿Qué dirección relativa entre un campo magnético y un alambre portador de corriente resulta en la fuerza más grande?
22. ¿Cómo detecta corriente eléctrica un galvanómetro?
23. ¿Cómo se llama un galvanómetro cuando se calibra para leer corriente? ¿Cuando se calibra para leer voltaje?
24. ¿Con qué frecuencia se invierte la corriente en las espiras de un motor eléctrico?
25. ¿Es correcto decir que un motor eléctrico es extensión de la física que sirve de base a un galvanómetro?

### 24.8 El campo magnético de la Tierra

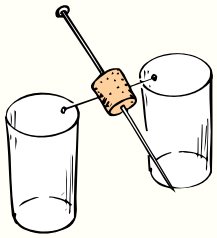
26. ¿Por qué es probable que no haya dominios magnéticos alineados en forma permanente en el núcleo de la Tierra?
27. ¿Qué son las inversiones de polo magnético?
28. ¿Cuál es la causa de las auroras boreales (luces del norte)?

### 24.9 Biomagnetismo

29. Menciona al menos seis criaturas que alojen pequeños imanes en el interior de sus cuerpos.
30. ¿Cuándo los rayos cósmicos penetran tu cuerpo?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

31. Encuentra la dirección y la inclinación de las líneas del campo magnético de la Tierra en tu localidad. Magnetiza una aguja grande de acero o un pedazo recto de alambre de acero al golpearlo una docena de veces con un imán potente. Pasa la aguja o el alambre a través de un corcho en tal forma que, cuando el corcho flote, tu delgado imán permanezca horizontal (paralelo a la superficie del agua). Para esto primero hay que ajustarlo de modo que se equilibre gravitacionalmente. Luego pon a flotar el corcho dentro de un recipiente de plástico o madera que contenga agua. Después coloca un par de alfileres comunes sin magnetizar a los lados del corcho. Pon a descansar los alfileres sobre los bordes de un par de vasos de modo que la aguja o el alambre apunte hacia el polo magnético. Debe inclinarse en línea con el campo magnético de la Tierra.



32. Una barra de hierro puede magnetizarse con facilidad si la alineas con las líneas de campo magnético de la Tierra y la golpeas ligeramente unas cuantas veces con un martillo. Esto funciona mejor si la barra se inclina para coincidir con la depresión del campo de la Tierra. El martillado sacude los dominios de modo que tienen mayor capacidad para alinearse con el campo de la Tierra. La barra puede desmagnetizarse si la golpeas cuando está orientada en una dirección este-oeste.

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

33. Muchos cereales secos están fortificados con hierro, que se agrega al cereal en forma de pequeñas partículas de hierro. ¿Cómo pueden separarse estas partículas del cereal?
34. ¿En qué sentido todos los imanes son electroimanes?
35. Todos los átomos tienen cargas eléctricas en movimiento. ¿Por qué, entonces, no todos los materiales son magnéticos?
36. Para fabricar una brújula, apunta un clavo de hierro ordinario a lo largo de la dirección del campo magnético de la Tierra (que, en el hemisferio norte, está inclinado hacia abajo y hacia el norte) y golpéalo repetidamente durante algunos segundos con un martillo o una roca. Luego cuélgalo de su centro de gravedad con una cuerda. ¿Por qué el acto de golpear magnetiza al clavo?
37. Si colocas un pedazo de hierro cerca del polo norte de un imán, ocurrirá atracción. ¿Por qué también ocurrirá atracción si colocas el mismo hierro cerca del polo sur del imán?
38. ¿Los polos de un imán de herradura se atraen entre sí? Si doblas el imán de modo que los polos se acerquen, ¿qué ocurre con la fuerza entre los polos?
39. ¿Por qué no es aconsejable hacer un imán de herradura con un material flexible?
40. ¿Qué tipo de campo de fuerza rodea una carga eléctrica estacionaria? ¿Qué otro campo la rodea cuando se mueve?
41. ¿Qué diferencia hay entre los polos magnéticos de los imanes de refrigerador comunes y los imanes de barra comunes?
42. Un amigo te dice que la puerta de un refrigerador, debajo de su revestimiento de plástico pintado, está hecha de aluminio. ¿Cómo podrías comprobar si esto es cierto (sin rayarlo de ninguna manera)?
43. ¿Por qué un imán atraerá un clavo ordinario o clip, pero no un lápiz de madera?
44. ¿Por qué los imanes permanentes en realidad no son permanentes?
45. ¿Cualquier polo de un imán atraerá un clip? Explica qué ocurre en el interior del clip atraído. (*Sugerencia:* considera la Figura 22.13.)
46. Una manera de fabricar una brújula es pegar una aguja magnetizada en un pedazo de corcho y ponerlo a flotar en un tazón lleno de agua. La aguja se alineará con el componente horizontal del campo magnético de la Tierra. Dado que el polo norte de esta brújula es atraído hacia el norte, ¿la aguja flotará hacia el lado norte del tazón? Defiende tu respuesta.

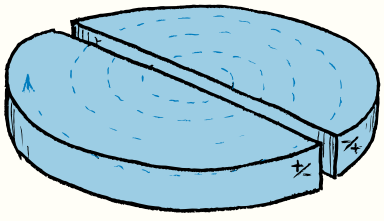
47. ¿Mediante qué mecanismo las limaduras de hierro mostradas alrededor del imán de la Figura 24.2 se alinean con el campo magnético?
48. El polo norte de una brújula es atraído hacia el polo magnético norte de la Tierra, aunque polos iguales se repelen. ¿Qué indica esto acerca de la polaridad del Imán Tierra en sus polos?
49. Se sabe que una brújula apunta hacia el norte porque la Tierra es un imán gigante. ¿La aguja que apunta hacia el norte apunta al norte cuando la brújula se lleva hacia el hemisferio sur?
50. ¿En qué posición puede ubicarse una espira de alambre portadora de corriente en un campo magnético de modo que no tienda a girar?
51. El imán A tiene un campo magnético con el doble de intensidad que el imán B (a igual distancia) y, a cierta distancia, jala sobre el imán B con una fuerza de 50 N. ¿Con cuánta fuerza, entonces, el imán B jala sobre el imán A?
52. En la Figura 24.15 se observa un imán que ejerce una fuerza sobre un alambre portador de corriente. ¿Un alambre portador de corriente ejerce una fuerza sobre un imán? ¿Por qué sí o por qué no?
53. Un imán potente atrae un clip hacia sí mismo con cierta fuerza. ¿El clip ejerce una fuerza sobre el imán potente? Si no lo hace, ¿por qué no? Si lo hace, ¿ejerce tanta fuerza sobre el imán como el imán ejerce sobre él? Defiende tus respuestas.
54. Un alambre recto portador de corriente está horizontal y orientado de sur a norte. Cuando la aguja de una brújula se coloca por abajo o arriba de él, ¿en qué dirección apunta la aguja de la brújula?
55. Una bocina consiste en un cono unido a una bobina portadora de corriente ubicada en un campo magnético. ¿Cuál es la relación entre las vibraciones en la corriente y las vibraciones del cono?

56. ¿Un imán superconductor usará menos potencia eléctrica que un electroimán tradicional de alambre de cobre con la misma intensidad de campo? Defiende tu respuesta.
57. Cuando se construyen embarcaciones con casco de hierro, la ubicación del embarcadero y la orientación de la embarcación en el embarcadero se registran en una placa de bronce permanentemente unida al navío. ¿Por qué?
58. Un haz de electrones pasa a través de un campo magnético sin desviarse. ¿Qué puedes concluir acerca de la orientación del haz en relación con el campo magnético? (Ignora cualquier otro campo.)
59. ¿Un electrón en reposo en un campo magnético estacionario puede ponerse en movimiento mediante el campo magnético? ¿Y qué hay de un electrón colocado en reposo en un campo eléctrico?
60. Un protón se mueve en una trayectoria circular perpendicular a un campo magnético constante. Si la intensidad del campo del imán aumenta, ¿el diámetro de la trayectoria circular aumenta, disminuye o permanece igual?
61. Dos partículas cargadas se proyectan hacia un campo magnético que es perpendicular a sus velocidades. Si las partículas se desvían en direcciones opuestas, ¿qué te dice esto acerca de ellos?
62. Un campo magnético puede desviar un haz de electrones, pero no puede realizar trabajo sobre los electrones para cambiar sus rapideces. ¿Por qué?
63. Se dice que dentro de un laboratorio hay o un campo eléctrico o un campo magnético, mas no ambos. ¿Qué experimentos puedes realizar para establecer qué tipo de campo hay en el laboratorio?
64. Los residentes del norte de Canadá son bombardeados con radiación cósmica más intensa que los residentes de México. ¿Por qué esto es así?
65. ¿Por qué los astronautas se mantienen a altitudes por abajo de los cinturones de radiación Van Allen cuando caminan en el espacio?
66. ¿Qué cambios en la intensidad de los rayos cósmicos en la superficie de la Tierra esperarías durante periodos en los cuales el campo magnético de la Tierra pasa por una fase cero mientras experimenta una inversión de polos?
67. En un espectrómetro de masas (consulta la Figura 34.14), se dirigen iones hacia un campo magnético, donde se curvan y después golpean un detector. Si varios átomos ionizados de manera individual viajan con la misma rapidez a través del campo magnético, ¿esperarías que todos ellos se desviaran por la misma cantidad, o diferentes iones se doblarían en distintas magnitudes? Defiende tu respuesta.
68. Una forma de proteger contra los rayos cósmicos un hábitat en el espacio exterior es con una frazada absorbente de cierto tipo, que funcionaría de forma muy parecida a la atmósfera que protege a la Tierra. Conjetura acerca de una segunda forma de proteger el hábitat que también sería similar al blindaje natural de la Tierra.
69. Si tienes dos barras de hierro, una magnetizada y una no magnetizada, y ningún otro material a la mano, ¿cómo podrías determinar cuál barra es el imán?

70. Históricamente, sustituir los caminos de tierra con caminos pavimentados redujo la fricción sobre los vehículos. Sustituir los caminos pavimentados con vías de acero redujo la fricción aún más. ¿Qué paso reciente elimina la fricción de las vías sobre los vehículos? ¿Qué fricción permanece después de eliminar la fricción de las vías?
71. ¿Un par de alambres portadores de corriente ejercen fuerza uno sobre otro?
72. ¿Cuál es el efecto magnético de colocar dos alambres, con iguales corrientes pero direcciones opuestas, juntos o girados uno en torno al otro?
73. En la preparación para un estudio de IRM, ¿por qué a los pacientes se les pide que se quiten gafas, relojes, joyería y otros objetos metálicos?

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

74. Tu compañero de estudio afirma que un electrón siempre experimenta una fuerza en un campo eléctrico, pero no siempre en un campo magnético. ¿Estás de acuerdo? ¿Por qué sí o por qué no?
75. Una "aguja de inclinación" es un pequeño imán montado sobre un eje horizontal de modo que pueda balancearse hacia arriba o hacia abajo (como una brújula colocada sobre su lado). ¿Dónde sobre la Tierra una aguja de inclinación apunta de manera casi vertical? ¿Dónde sobre la Tierra apuntará de manera casi horizontal?
76. ¿En qué dirección apuntará la aguja de una brújula, si tiene libertad de apuntar en todas direcciones, cuando se ubique cerca del polo magnético norte de la Tierra en Canadá?
77. ¿Cuál es la fuerza magnética neta sobre la aguja de una brújula? ¿Mediante qué mecanismo la aguja de una brújula se alinea con un campo magnético?
78. Tu amigo dice que, cuando una brújula se lleva a través del ecuador, da la vuelta y apunta en la dirección opuesta. Tu otro amigo dice que esto no es verdad, que las personas en el hemisferio sur usan el polo magnético sur de la brújula para apuntar hacia el polo más cercano. ¿Tú qué dices?
79. Un ciclotrón es un aparato que acelera partículas cargadas a gran rapidez mientras siguen una trayectoria en espiral que se expande. Las partículas cargadas están sujetas tanto a un campo eléctrico como a un campo magnético. Uno de estos campos aumenta la rapidez de las partículas cargadas, y el otro campo hace que sigan una trayectoria curva. ¿Cuál campo realiza cuál función?



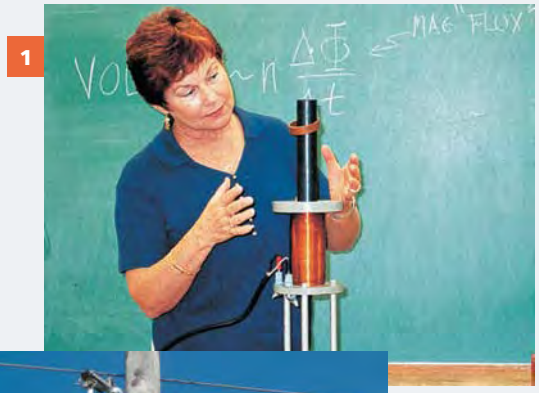
80. Un imán puede ejercer una fuerza sobre una partícula cargada pero no puede cambiar la energía cinética de la partícula. ¿Por qué no?
81. Un haz de protones de alta energía sale de un ciclotrón. ¿Supones que hay un campo magnético asociado a estas partículas? ¿Por qué sí o por qué no?
82. Cuando una corriente pasa a través de un resorte devanado helicoidalmente, el resorte se contrae como si se comprimiera. ¿Cuál es tu explicación?

25

CAPÍTULO 25

# Inducción electromagnética


25.1 Inducción electromagnética
25.2 Ley de Faraday
25.3 Generadores y corriente alterna
25.4 Producción de potencia
25.5 Transformadores
25.6 Autoinducción
25.7 Transmisión de potencia
25.8 Inducción de campo


1

2

3

4

1 Jean Curtis suscita una discusión entre los alumnos para explicar por qué el anillo de cobre levita sobre el núcleo de hierro del electroimán. 2 Un transformador de vecindario común por lo general disminuye 2,400 volts a 240 volts para las casas y pequeños negocios. 3 Z. Tugba Kahyaoglu muestra a sus alumnos cómo un imán modifica el giro de una armadura cuando invierte la polaridad del imán. 4 Sheron Snyder convierte energía mecánica en energía electromagnética, la que a su vez se convierte en luz.

En tiempos pasados, la mayoría de los grandes colaboradores científicos eran hombres con recursos financieros. Las personas que no tenían dinero estaban muy ocupadas ganándose la vida y no disponían del tiempo que exigen las investigaciones científicas serias. Michael Faraday fue una excepción.

Michael Faraday fue uno de los cuatro hijos de James Faraday, quien era herrero en un pueblo al sureste de Londres. Michael sólo tenía una educación escolar básica y fue en gran medida autodidacta. A los 13 años de edad se convirtió en aprendiz de un encuadernador local y, durante su aprendizaje de siete años, leyó muchos libros en el taller de encuadernación. Se interesó mucho en la ciencia, especialmente en la electricidad. En 1812, al final de su formación, y con 20 años de edad, Faraday asistió a las conferencias impartidas por el renombrado químico inglés sir Humphry Davy, de la *Royal Institution* y la *Royal Society*. Faraday tomó apuntes detallados, los puso en forma de libro y envió a Davy un libro con más de 300 páginas de las conferencias. Davy quedó muy impresionado y felicitó a Faraday, aunque al principio le recomendó permanecer en el negocio de la encuadernación. Sin embargo, al año siguiente, cuando el asistente de Davy fue despedido por peleonero, Davy invitó a Faraday a ocupar su puesto.

En la sociedad inglesa clasista de la época, Faraday no era considerado un caballero. Cuando Davy fue a una gira de 18 meses por el continente, en compañía de su esposa, Faraday fue con ellos pero viajó afuera del carruaje y comió con la servidumbre porque la esposa de Faraday se rehusó a tratarlo como un igual. No obstante, Faraday tuvo oportunidad de conocer a la élite científica de Europa y escuchó un montón de ideas estimulantes.

Faraday se encaminó a ser uno de los más importantes científicos experimentales de la época. Realizó descubrimientos importantes en química, electrólisis y especialmente electricidad y magnetismo. En 1831 hizo su más notable descubrimiento. Cuando movió un imán hacia las espiras de un alambre, indujo corriente eléctrica en ellas. Ésta es la *inducción electromagnética*, que coincidentemente la descubrió más o menos al mismo tiempo en Estados Unidos Joseph Henry (el material para el aislamiento de las espiras de alambre de Henry fue donado, con lágrimas en los ojos, por su esposa, quien sacrificó parte de la seda de su vestido de bodas para cubrir los alambres). En aquella época la única forma de producir una corriente eléctrica sustancial era con baterías. La inducción electromagnética dio lugar a la era de la electricidad.

Las habilidades matemáticas de Faraday se limitaban al álgebra simple y no se extendían hasta la trigonometría. En consecuencia, comunicó sus ideas de manera gráfica y con lenguaje simple. Imaginó que los efectos eléctricos y magnéticos serían transportados por "líneas de fuerza". Ahora se les llama líneas de campos eléctrico y magnético, y siguen siendo herramientas útiles en la ciencia y la ingeniería.

Faraday rehusó participar en la producción de armas químicas para la guerra de Crimea por razones éticas. Era profundamente religioso y conoció a su esposa, Sarah Barnard, mientras asistía a la iglesia. No tuvieron hijos. Fue elegido para ser miembro de sociedades prestigiosas y gozó de un alto estatus científico en sus últimos años de vida. Rechazó ser caballero y dos veces se negó a ser presidente de la *Royal Society*. Destinó grandes esfuerzos a proyectos de servicio para compañías privadas y el gobierno británico: aumentó la seguridad de las minas de carbón, inventó nuevas formas de operar los faros para la navegación y halló otras maneras de controlar la contaminación. Faraday fue un auténtico "ecologista".

La unidad de capacitancia eléctrica, el farad, recibe su nombre en honor de Faraday. Murió a la edad de 75 años, en 1867. Antes de su muerte rechazó que se le sepultara en la abadía de Westminster. Ahí se encuentra una placa conmemorativa con su nombre, cerca de la tumba de Isaac Newton. De hecho, Faraday fue enterrado en un lote en la iglesia a la que asistía.

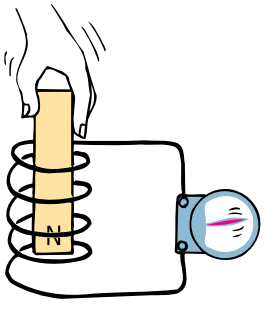



**FIGURA 25.1**
Cuando el imán se coloca en la bobina, se induce un voltaje en la bobina y sus cargas se ponen en movimiento.

## 25.1 Inducción electromagnética

Faraday y Henry descubrieron que la corriente eléctrica podía producirse en un alambre con sólo mover un imán adentro o afuera de sus espiras (Figura 25.1). No se necesitan baterías ni ninguna otra fuente de voltaje, sólo el movimiento de un imán en una espira de alambre. Este fenómeno de inducir voltaje al cambiar el campo magnético en las espiras de alambre se llama **inducción electromagnética**. El voltaje es causado, o *inducido*, por el movimiento relativo entre un alambre y un campo magnético; esto es: que el campo magnético de un imán se mueva cerca de un conductor estacionario o que el conductor se mueva en un campo magnético estacionario (Figura 25.2).

Cuanto más grande sea el número de espiras de alambre que se mueven en un campo magnético, mayor es el voltaje inducido (Figura 25.3). Empujar un imán en una bobina con el doble de espiras inducirá el doble de voltaje; empujarlo en una bobina con 10 veces más espiras inducirá 10 veces más voltaje; y así sucesivamente. Puede parecer

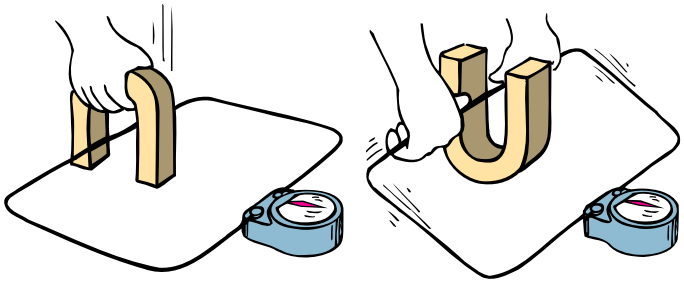


**FIGURA 25.2**
En la espira de alambre se induce un voltaje cuando el campo magnético se mueve y pasa por el alambre o el alambre se mueve por el campo magnético.

que se obtiene algo (energía) a cambio de nada con sólo aumentar el número de espiras en una bobina de alambre. Pero, si supones que la bobina está conectada a un resistor u otro dispositivo que disipa energía, esto no es así. Se descubre que es más difícil empujar el imán al interior de una bobina compuesta por un número mayor de espiras.

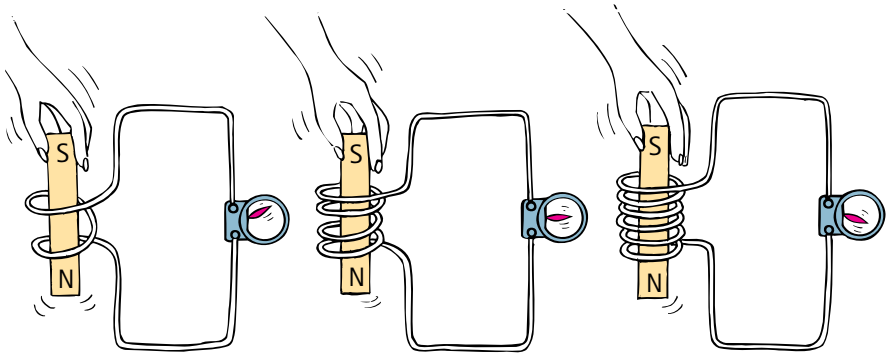



**FIGURA 25.3**
Cuando un imán se inserta en una bobina que tiene el doble de espiras que otra bobina, se induce el doble de voltaje. Si el imán se inserta en una bobina con tres veces más espiras, entonces se induce tres veces más voltaje.

Esto se debe a que el voltaje inducido produce una corriente, que, a su vez, produce un electroimán, el cual repele el imán en tu mano. Más espiras significan más voltaje, lo cual significa que se realiza más trabajo para inducirlo (Figura 25.4). La cantidad de voltaje inducido depende de cuán rápido las líneas de campo magnético entran o salen de la bobina. Un movimiento muy lento apenas produce voltaje. El movimiento rápido induce mayor voltaje.

La inducción electromagnética está a tu alrededor. En la carretera, ésta activa los semáforos cuando un automóvil pasa por encima de las bobinas de alambre que están bajo la superficie de la carretera, y cambia su campo magnético. Los automóviles híbridos la utilizan para convertir la energía del frenado en energía eléctrica para sus baterías. La inducción electromagnética la percibes en los sistemas de seguridad de los aeropuertos cuando cruzas bobinas verticales y, si llevas contigo una cantidad importante de hierro, éste cambia el campo magnético de las bobinas y dispara una alarma. Se le utiliza en las tarjetas bancarias cuando su banda magnética se desliza por un escáner. Como verás al final del capítulo, y al comienzo del siguiente, incluso es la base de las ondas electromagnéticas que llamas luz.

**FIGURA 25.4**
Es más difícil empujar el imán en una bobina que tiene más espiras porque el campo magnético de cada espira de corriente resiste al movimiento del imán.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿La inducción electromagnética (IEM) es una fuente de energía?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

No. La IEM no es una fuente de energía, sino una manera de transformar energía mecánica en energía eléctrica. Para producir energía mediante IEM es indispensable realizar trabajo.

Cambiar un campo magnético en una espira cerrada induce un voltaje. Si la espira está en un conductor eléctrico, entonces se induce corriente.

**FIGURA 25.5**
Las pastillas fonocaptoras de las guitarras son pequeñas bobinas con imanes en su interior. Los imanes magnetizan las cuerdas de acero. Cuando las cuerdas vibran, se induce un voltaje en las bobinas y se aumenta mediante un amplificador; el sonido se produce mediante una bocina.

## 25.2 Ley de Faraday

La inducción electromagnética se resume mediante la **ley de Faraday**, que afirma:[1]

**El voltaje inducido en una bobina es proporcional al producto de su número de espiras, el área transversal de cada espira y la tasa a la que cambia el campo magnético dentro de dichas espiras.**

La cantidad de *corriente* producida por la inducción electromagnética depende no sólo del voltaje inducido, sino también de la resistencia de la bobina y el circuito al cual está conectado.[2] Por ejemplo, un imán se puede insertar y sacar de una espira cerrada de caucho y meter y sacar de una espira cerrada de cobre. El voltaje inducido en cada una es el mismo, siempre que las espiras sean del mismo tamaño y el imán se mueva con la misma rapidez. Pero la corriente en cada una es muy diferente. Los electrones en el caucho perciben el mismo campo eléctrico que los del cobre, pero sus enlaces con los átomos fijos impiden el movimiento de la carga que ocurre de un modo tan libre en el cobre.

Se han mencionado dos formas de inducir voltaje en una espira de alambre: cuando mueves la espira cerca de un imán y cuando mueves un imán cerca de la espira. Existe una tercera forma: cuando cambias una corriente en una espira cercana. Los tres casos tienen el mismo ingrediente esencial: un campo magnético variable en la espira.

**pti**

- Las linternas de inducción no necesitan baterías. Sacude la linterna durante más o menos 30 segundos y generarás hasta 5 minutos de iluminación brillante. La inducción electromagnética ocurre cuando un imán interno se desliza entre las bobinas que cargan un capacitor. Cuando el brillo disminuya, sacude de nuevo. Tú eres quien suministra la energía para cargar el capacitor.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Qué ocurre cuando un bit de información almacenado magnéticamente en un disco de computadora gira bajo la cabeza lectora que contiene una pequeña bobina?**
2. **Si empujas un imán dentro de una bobina conectada a un resistor, como se muestra en la Figura 25.4, sentirás resistencia cuando empujas. ¿Por qué esta resistencia es mayor en una bobina que tiene más espiras?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. El campo magnético variable de la bobina induce un voltaje. De esta forma, la información almacenada magnéticamente en el disco se convierte en señales eléctricas.
2. Dicho de manera simple, se necesita más trabajo que suministre más energía para que más corriente la disipe en el resistor. También puedes verlo de esta forma: cuando empujas un imán dentro de una bobina, haces que la bobina se convierta en un imán (un electroimán). Cuantas más espiras haya en la bobina, más intenso será el electroimán que produzcas y con más fuerza empujará de vuelta contra el imán que estás moviendo. (Si el electroimán de la bobina atrajera a tu imán en lugar de repelerlo, se crearía energía de la nada y se violaría la ley de conservación de la energía. Pero esto no ocurre.)

**SCREENCAST: Inducción electromagnética**

Cuando bajas la rapidez de un automóvil híbrido al frenarlo, el motor eléctrico se convierte en un generador y carga una batería.

[1]En forma de ecuación,

$$\text{Voltaje inducido} \sim \text{número de espiras} \times \text{área de cada espira} \times \frac{\Delta \text{ campo magnético}}{\Delta \text{ tiempo}}$$

[2]La corriente también depende de la "inductancia" de la bobina. La inductancia mide la tendencia de una bobina a resistir un cambio de corriente porque el magnetismo producido por una parte de la bobina actúa para oponerse al cambio de corriente en otras partes de la bobina. En los circuitos CA, es semejante a la resistencia, lo que depende de la frecuencia de la fuente CA y del número de espiras de la bobina. En este libro no se abordará este tema.

## 25.3 Generadores y corriente alterna

Cuando un extremo de un imán se inserta y se saca repetidas veces de una bobina de alambre, la dirección del voltaje inducido alterna. A medida que aumenta la intensidad del campo magnético dentro de la bobina (a medida que el imán entra en la bobina), el voltaje inducido en la bobina se dirige en una dirección. Cuando la intensidad del campo magnético disminuye (a medida que el imán sale de la bobina), el voltaje se induce en la dirección opuesta. La frecuencia del voltaje alterno que se induce es igual a la frecuencia del campo magnético variable en el interior de la espira.

Es más práctico inducir voltaje con el movimiento de una bobina que con el movimiento de un imán. Esto puede hacerse si giras la bobina (o espira) en un campo magnético estacionario (Figura 25.6). Esta configuración se llama **generador**. La construcción de un generador es, en principio, idéntica a la de un motor. Parecen iguales, pero las funciones de entrada y salida se invierten. En un motor, la energía eléctrica es la entrada y la energía mecánica es la salida; en un generador, la energía mecánica es la entrada y la energía eléctrica es la salida. Ambos dispositivos tan sólo transforman energía de una forma en otra.

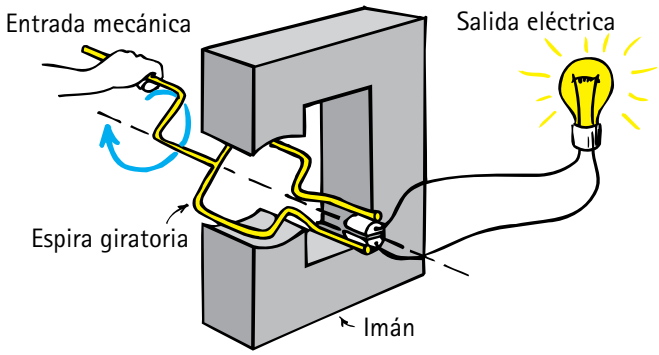



**FIGURA 25.6**
Un generador simple. En la espira se induce un voltaje cuando ésta gira en el campo magnético.

Es interesante comparar la física de un motor y un generador y ver que ambos funcionan de acuerdo con el mismo principio básico: que electrones en movimiento experimentan una fuerza que es mutuamente perpendicular tanto a su velocidad como al campo magnético que atraviesan (Figura 25.7). A la desviación del alambre (movimiento como resultado de la corriente) se le llamará *efecto motor*, y a lo que ocurre como resultado de la ley de la inducción (corriente como resultado de movimiento) se le llamará *efecto generador*. Estos efectos se resumen en las partes (a) y (b) de la figura (donde, por convención, las flechas de corriente y fuerza se aplican a una carga positiva). Estúdialas. ¿Puedes observar que los dos efectos están relacionados?

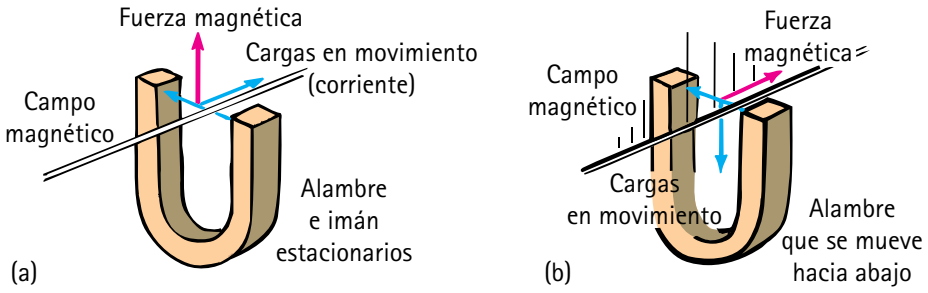



**FIGURA 25.7**
(a) Efecto motor: cuando la carga se mueve a lo largo del alambre, hay una fuerza ascendente perpendicular sobre la carga. Dado que no hay una ruta conductora ascendente, la fuerza sobre la carga jala el alambre hacia arriba. (b) Efecto generador: cuando un alambre sin corriente inicial se mueve hacia abajo, la carga en el alambre experimenta una fuerza de deflexión perpendicular a su movimiento. Existe una ruta conductora en esta dirección, de modo que la carga se mueve y constituye una corriente.

En la Figura 25.8 puedes ver el ciclo de inducción electromagnética. Observa que, cuando la espira de alambre gira en el campo magnético, cambia el número de líneas de campo magnético en el interior de la espira. Cuando el plano de la espira es perpendicular a las líneas de campo, se encierra el número máximo de líneas. A medida que la espira gira, en efecto corta las líneas, de modo que menos líneas están encerradas. Cuando el plano de la espira es paralelo a las líneas de campo, ninguna línea está encerrada. La rotación continua aumenta y disminuye el número de líneas encerradas en una forma cíclica, y la mayor tasa de cambio en las líneas de campo ocurre cuando el número de líneas de campo encerradas se vuelve cero. Por tanto, el voltaje inducido es mayor a medida que la espira gira y pasa por una orientación

**VIDEO: Aplicación de la IEM**

paralela a las líneas. Puesto que el voltaje inducido por el generador alterna, la corriente producida es CA, corriente alterna.[3] La corriente alterna de las casas se produce con generadores estandarizados, de modo que la corriente pasa por 60 ciclos de cambio a cada segundo: 60 hertz.

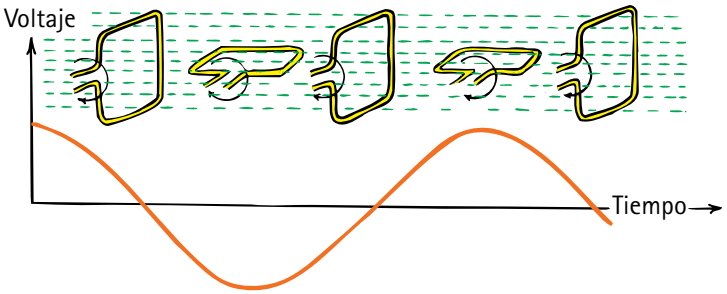



**FIGURA 25.8**
A medida que la espira gira, el voltaje inducido (y la corriente) cambia de magnitud y dirección. Una rotación completa de la espira produce un ciclo completo en el voltaje (y en la corriente).

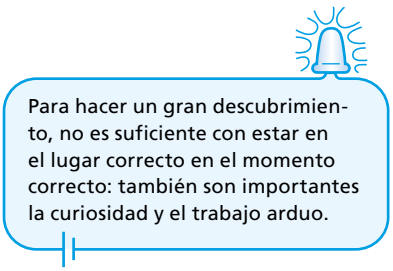
**PUNTO DE CONTROL**

**¿En qué momento se necesita una entrada de energía para que salga energía mediante inducción electromagnética?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**
Siempre.

## 25.4 Producción de potencia

Unos 50 años después de que Michael Faraday y Joseph Henry descubrieran la inducción electromagnética, Nikola Tesla y George Westinghouse dieron un uso práctico a estos hallazgos y demostraron al mundo que la electricidad podía generarse de manera confiable y en cantidades suficientes para iluminar ciudades enteras.




### Potencia de turbogenerador

Tesla construyó generadores muy parecidos a los que están en funcionamiento en la actualidad, pero un poco más complicados que el modelo sencillo que se analizó antes. Los generadores de Tesla tenían armaduras —núcleos de hierro enrollados con manojos de alambre de cobre— que se hacían girar dentro de intensos campos magnéticos mediante una turbina, la cual, a su vez, giraba mediante la energía del vapor o del agua que caía. Las espiras de alambre giratorias de la armadura cortaban el campo magnético de los electroimanes circundantes, lo que en consecuencia inducía un voltaje y una corriente alternos.

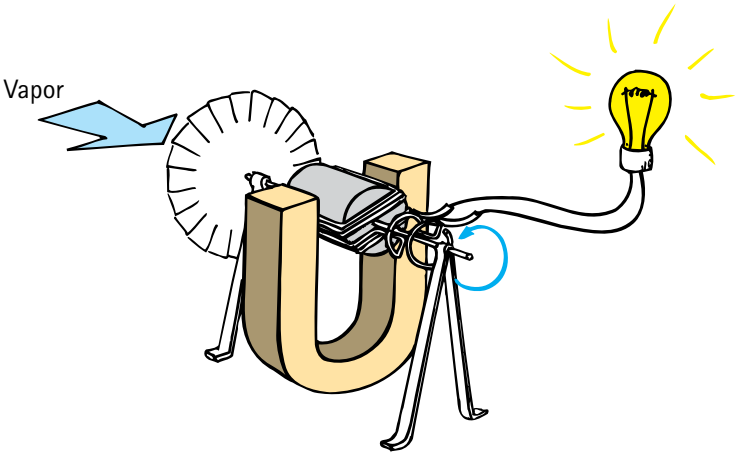



**FIGURA 25.9**
El vapor impulsa la turbina, que está conectada a la armadura del generador.

Puedes pensar en este proceso desde un punto de vista atómico. Cuando los alambres de la armadura giratoria cortan el campo magnético, fuerzas electromagnéticas con dirección opuesta actúan sobre las cargas negativas y positivas. Los electrones responden a esta fuerza con un movimiento masivo momentáneo relativamente libre en una dirección por toda la retícula cristalina del cobre; los átomos de cobre, que en realidad son iones positivos, se fuerzan en la dirección contraria. Sin embargo, dado que los iones están anclados en la retícula, es difícil que lleguen a moverse. Sólo los electrones se mueven; se desplazan de ida y vuelta en forma alternada con cada rotación de la

[3]Con escobillas apropiadas y otros medios, la CA de las espiras puede convertirse en CD para hacer un generador CD.

armadura. La energía de este desplazamiento electrónico se registra en los electrodos terminales del generador.

## Potencia MHD

Un interesante dispositivo, similar al turbogenerador, es el generador MHD (magnetohidrodinámico), que elimina la turbina y la armadura giratoria por completo. En lugar de hacer que las cargas se muevan en un campo magnético vía una armadura giratoria, un plasma de electrones e iones positivos se expande por una boquilla y se mueve con rapidez supersónica a través de un campo magnético. Al igual que en la armadura de un turbogenerador, el movimiento de las cargas a través de un campo magnético da lugar a un voltaje y a un flujo de corriente en concordancia con la ley de inducción de Faraday. Mientras que las "escobillas" de un generador convencional llevan la corriente hacia el circuito de carga externo, en el generador MHD la misma función la realizan placas conductoras, o *electrodos* (Figura 25.10). A diferencia del turbogenerador, el generador MHD puede operar a cualquier temperatura a la que pueda calentarse el plasma, ya sea por combustión o por procesos nucleares. La temperatura alta resulta en una eficiencia termodinámica alta, lo cual significa más potencia por la misma cantidad de combustible y menos calor de desecho. La eficiencia aumenta aún más cuando el calor de "desecho" se utiliza para convertir agua en vapor y accionar un generador convencional de turbina de vapor.

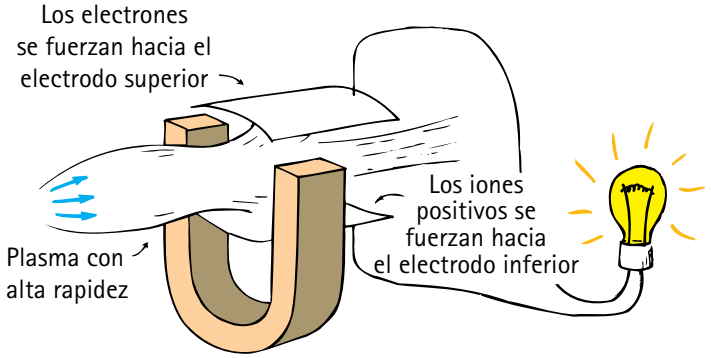



**FIGURA 25.10**
Un generador MHD simplificado. Fuerzas con direcciones opuestas actúan sobre las partículas positivas y negativas en el plasma de alta rapidez que se mueve por el campo magnético. El resultado es una diferencia de voltaje entre los dos electrodos. Entonces fluye corriente de un electrodo al otro a través de un circuito externo. No hay partes móviles; sólo el plasma se mueve. En la práctica, se usan electroimanes superconductores.

Esta sustitución de las bobinas de cobre giratorias por un plasma que fluye se ha vuelto funcional sólo a partir del desarrollo de la tecnología para producir plasmas con una temperatura suficientemente alta. Las plantas de corriente utilizan un plasma a alta temperatura formado por la combustión de combustibles fósiles en aire u oxígeno.[4]

Es importante saber que los generadores no producen energía, tan sólo convierten energía de alguna otra forma en energía eléctrica. Como se estudió en el Capítulo 7, la energía de una fuente, ya sea combustible fósil o nuclear, o viento o agua, se convierte en energía mecánica para impulsar la turbina. El generador unido convierte la mayor parte de esta energía mecánica en energía eléctrica. Algunas personas creen que la electricidad es una fuente primaria de energía. No lo es. Es un portador de energía que necesita una fuente.

# 25.5 Transformadores

Sin duda, la energía eléctrica puede transportarse a lo largo de alambres, y ahora se verá cómo puede transportarse a través del espacio vacío. La energía puede transferirse de un dispositivo a otro con el arreglo simple que se muestra en la Figura 25.11. Observa que un embobinado está conectado a una batería y el otro está conectado a un galvanómetro. Es habitual referirse al embobinado conectado a la fuente de poder como el *primario* (entrada) y al otro como el *secundario* (salida). En cuanto el interruptor se cierra en el primario y la corriente pasa a través de su embobinado, una corriente también ocurre en el secundario, aun cuando no haya conexión material entre los dos embobinados. Sin embargo, en el secundario, sólo ocurre un breve pico de corriente. Después, cuando se abre el interruptor del primario, de nuevo se registra un pico de corriente en el secundario, pero en la dirección opuesta.

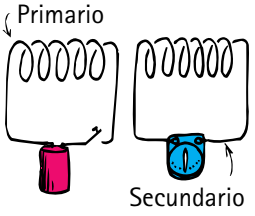



**FIGURA 25.11**
Siempre que el interruptor del primario se abre o se cierra, se induce un voltaje en el circuito secundario.

Ésta es la explicación: cuando la corriente comienza a fluir por el embobinado, alrededor del primario se acumula un campo magnético. Esto significa que el campo magnético crece (esto es, *cambia*) alrededor del primario. Pero, dado que los embobinados

[4]Temperaturas más bajas son suficientes cuando el fluido conductor de electricidad es un metal líquido, por lo general litio. Un sistema de potencia MHD de metal líquido se conoce como sistema de potencia LMMHD (por sus siglas en inglés).

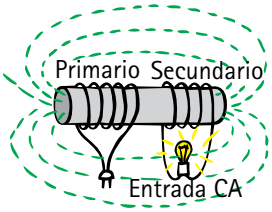



**FIGURA 25.12**
Un transformador simple.

están cerca uno del otro, este campo variable se extiende hacia el embobinado secundario, lo que en consecuencia induce un voltaje en el secundario. Este voltaje inducido sólo es temporal porque, cuando la corriente y el campo magnético del secundario llegan a un estado estacionario —esto es, cuando el campo magnético ya no cambia—, ya no se induce un voltaje en el secundario. Pero, cuando el interruptor se apaga, la corriente en el primario desciende a cero. El campo magnético alrededor del embobinado colapsa, con lo que induce un voltaje en el embobinado secundario, que percibe el cambio. Se observa que el voltaje se induce siempre que un campo magnético *cambia* a través del embobinado, sin importar la razón.

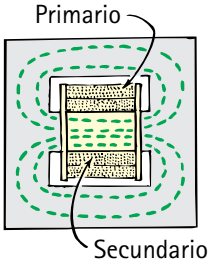
**PUNTO DE CONTROL**

**Cuando el interruptor del primario de la Figura 25.11 se abre o se cierra, el galvanómetro del secundario registra una corriente. Pero cuando el interruptor permanece cerrado, no se registra corriente en el galvanómetro del secundario. ¿Por qué?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Cuando el interruptor permanece en la posición cerrada, existe una corriente estacionaria en el primario y un campo magnético estacionario alrededor del embobinado. Este campo se extiende hacia el secundario pero, a menos que haya un *cambio* en el campo, no ocurre inducción electromagnética.

Si colocas un núcleo de hierro dentro de los embobinados primario y secundario de la configuración de la Figura 25.11, el campo magnético dentro del primario se intensifica por la alineación de dominios magnéticos. El campo también se concentra en el núcleo y se extiende hacia el secundario, que intercepta más del cambio en el campo. El galvanómetro mostrará picos de corriente mayores cuando el interruptor del primario se abra o cierre. En lugar de abrir y cerrar un interruptor para producir el cambio del campo magnético, supón que para activar al primario se usa una corriente alterna. Entonces, la frecuencia de los cambios periódicos en el campo magnético es igual a la frecuencia de la corriente alterna. Ahora se tiene un **transformador** (Figura 25.12). En la Figura 25.13 se muestra una configuración más eficiente.



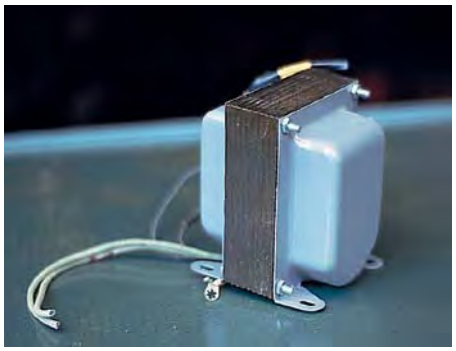



**FIGURA 25.13**
Un transformador práctico y más eficiente. Los embobinados primario y secundario están enrollados en la parte interna del núcleo de hierro (amarillo), lo que guía las líneas magnéticas alternas (verde) producidas por la CA en el primario. El campo alternante induce un voltaje CA en el secundario. En consecuencia, la potencia a un voltaje del embobinado primario se transfiere al embobinado secundario a un voltaje diferente.

Si el primario y el secundario tienen igual número de espiras de alambre (por lo general llamadas *vueltas*), entonces los voltajes alternos de entrada y salida serán iguales. Pero si el embobinado secundario tiene más vueltas que el primario, el voltaje alterno producido en el embobinado secundario será mayor que el producido en el primario. En este caso, se dice que el voltaje *sube* (*aumenta*). Si el secundario tiene el doble de vueltas que el primario, el voltaje en el secundario será el doble que en el primario.

Puedes ver esto con las configuraciones de la Figura 25.14. Considera primero el caso simple de una sola espira primaria conectada a una fuente alterna de 1 volt, y una sola espira secundaria conectada al voltímetro CA (a). La espira secundaria intercepta el campo magnético variable de la primaria, y un voltaje de 1 V se induce en la

secundaria. Si otra espira se enrolla alrededor del núcleo, de modo que el transformador tenga dos secundarios (b), intercepta el mismo cambio en el campo magnético. Se ve que en este embobinado también se induce 1 V. No hay necesidad de separar ambos secundarios. Podrías unirlos (c) y aún así tener un voltaje inducido total de 1 V + 1 V, o 2 V. Esto es equivalente a decir que un voltaje de 2 V se inducirá en un solo secundario que tenga el doble de espiras que el primario. Si el secundario se devana con tres veces más espiras, entonces se inducirá el triple de voltaje. El voltaje incrementado puede iluminar una señal de neón o enviar potencia a través de una larga distancia.

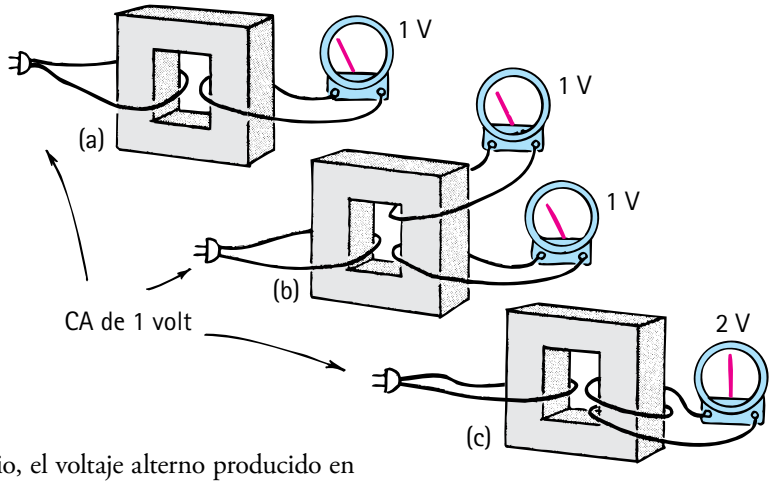



**FIGURA 25.14**
(a) El voltaje de 1 V inducido en el secundario es igual al voltaje del primario. (b) Un voltaje de 1 V también se induce en el secundario agregado porque intercepta el mismo cambio en campo magnético del primario. (c) Los voltajes de 1 V cada uno inducidos en los dos secundarios de una vuelta son equivalentes a un voltaje de 2 V inducido en un solo secundario de dos vueltas.

Si el secundario tiene menos vueltas que el primario, el voltaje alterno producido en el secundario será *menor* que el producido en el primario. Se dice que el voltaje *se reduce*. Este voltaje reducido puede operar con seguridad un tren eléctrico de juguete. Si el secundario tiene la mitad de vueltas que el primario, entonces sólo la mitad de voltaje se induce en el secundario. De modo que la energía eléctrica puede alimentarse en el primario a un voltaje alterno dado y tomarse del secundario a un voltaje alterno mayor o menor, dependiendo del número relativo de vueltas en los devanados de las bobinas primaria y secundaria. La relación entre los voltajes primario y secundario con respecto al número relativo de vueltas está dada por:

$$\frac{\text{Voltaje primario}}{\text{Número de vueltas del primario}} = \frac{\text{voltaje del secundario}}{\text{número de vueltas del secundario}}$$

Podría parecer que se obtiene algo por nada con un transformador que sube el voltaje. No es así, pues la conservación de la energía siempre regula lo que puede ocurrir. Cuando el voltaje sube, la corriente en el secundario es menor que en el primario. En realidad, el transformador transfiere energía de una bobina a la otra. No te equivoques en este punto: un transformador de ninguna forma puede aumentar la energía, eso nunca pasa de acuerdo con la conservación de energía. Un transformador incrementa o disminuye el voltaje sin un cambio de energía. La tasa a la que la energía se transfiere se llama *potencia*. La potencia usada en el secundario la suministra el primario. El primario no da más de lo que usa el secundario, de acuerdo con la ley de conservación de la energía. Si ignoras la pequeña pérdida de potencia debida al calentamiento de los embobinados y el núcleo, entonces

$$\text{Potencia dentro del primario} = \text{potencia fuera del secundario}$$

La potencia eléctrica es igual al producto del voltaje y la corriente, por lo que puede decirse

$$(\text{Voltaje} \times \text{corriente})_{\text{primario}} = (\text{voltaje} \times \text{corriente})_{\text{secundario}}$$

Se ve que, si el secundario tiene más voltaje que el primario, tendrá menos corriente que el secundario. La facilidad con la que los voltajes pueden incrementarse o disminuirse con un transformador es la principal razón por la que la mayoría de la potencia eléctrica es CA en lugar de CD.

## PUNTO DE CONTROL

1. **Si 100 V de CA pasan a través del primario de 100 vueltas de un transformador, ¿cuál será la salida de voltaje si el secundario tiene 200 vueltas?**
2. **Si supones que la respuesta a la pregunta anterior es 200 V y el secundario está conectado a un reflector con una resistencia de 50 Ω, ¿cuál será la corriente CA en el circuito secundario?**
3. **¿Cuál es la potencia en el embobinado secundario?**

4. **¿Cuál es la potencia en el embobinado primario?**
5. **¿Cuál es la corriente CA extraída por el embobinado primario?**
6. **El voltaje subió y la corriente bajó. La ley de Ohm dice que un aumento de voltaje producirá un aumento de la corriente. ¿Existe aquí alguna contradicción, o la ley de Ohm no se aplica a circuitos que tengan transformadores?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. A partir de $\frac{100\text{ V}}{100\text{ vueltas del primario}} = \frac{x\text{ V}}{200\text{ vueltas del secundario}}$, verás que $x = 200$ V.
2. A partir de la ley de Ohm, 200 V/50 Ω = 4 A.
3. Potencia = voltaje × corriente = 200 V × 4 A = 800 W.
4. Por la ley de conservación de la energía, la potencia en la bobina primaria es la misma, 800 W.
5. 8 A, el doble (100 V × ? A = 800 W).
6. ¡La ley de Ohm está vivita y coleando! La corriente en el secundario es igual al voltaje inducido dividido entre la carga (resistencia), pero es menor sólo cuando se compara con la corriente mayor extraída por el primario. $IV_{primario} = IV_{secundario}$. Es interesante que no haya una resistencia convencional en el primario, sólo una resistencia a la transferencia de energía hacia el secundario (consulta la Figura 25.4).

## 25.6 Autoinducción

Las espiras portadoras de corriente de una bobina interactúan no sólo con las espiras de otras bobinas, sino también con las espiras de la misma bobina. Cada espira de una bobina interactúa con el campo magnético alrededor de la corriente de otras espiras de la misma bobina. Esto es *autoinducción*. Se produce un voltaje autoinducido. Este voltaje siempre está en una dirección que se opone al voltaje variable que lo produce y suele denominarse "fuerza contraelectromotriz" o simplemente "contra-fem".[5] En este libro no se abordará la autoinducción ni las contra-fem, excepto para reconocer un efecto común y peligroso.

Supón que una bobina con un gran número de vueltas se usa como electroimán y se activa con una fuente CD, tal vez una batería pequeña. Entonces, la corriente de la bobina se acompaña de un intenso campo magnético. Cuando se desconecta la batería por abrir un interruptor, mejor prepárate para una sorpresa. Cuando el interruptor se abre, la corriente en el circuito desciende rápidamente a cero y el campo magnético de la bobina experimenta una reducción súbita (Figura 25.15). ¿Qué ocurre cuando en una bobina cambia de manera súbita un campo magnético, incluso si es la misma bobina la que lo produce? La respuesta es que se induce un voltaje. El campo magnético que colapsa en forma rápida, con su almacén de energía puede inducir un voltaje enorme, tan grande que desarrolla una fuerte chispa a través del interruptor, ¡o hacia ti, si tú eres quien abre el circuito! Por esta razón, los electroimanes están conectados a un circuito que absorbe la carga excesiva y evita que la corriente caiga muy súbitamente. Esto reduce el voltaje autoinducido. Por cierto, ésta también es la razón por la cual, para desconectar los electrodomésticos, debes apagar el interruptor, y no jalar el enchufe. Los circuitos del interruptor pueden evitar un cambio súbito de corriente.

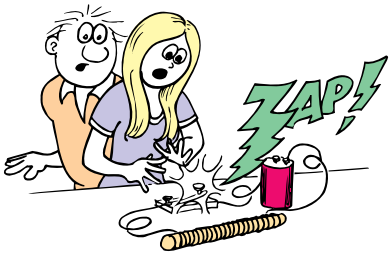



**FIGURA 25.15**
Cuando el interruptor se abre, el campo magnético de la bobina colapsa. Este cambio súbito en el campo puede inducir un voltaje enorme.

[5]La oposición de un efecto de inducción a una causa inductora se conoce como *ley de Lenz*; ésta es una consecuencia de la conservación de la energía.

## 25.7 Transmisión de potencia

Casi toda la energía eléctrica que se vende en la actualidad está en forma de CA, de manera tradicional debido a la facilidad con la que puede transformarse de un voltaje a otro.[6] Grandes corrientes en los alambres producen calor y pérdidas de energía, de modo que la potencia se transmite a lo largo de grandes distancias a voltajes altos y corrientes respectivamente bajas (potencia = voltaje × corriente). La potencia se genera a 25,000 V o menos y se incrementa cerca de la estación eléctrica hasta a 750,000 V para una transmisión a larga distancia, luego se disminuye por etapas en subestaciones y puntos de distribución hasta los voltajes usados en las aplicaciones industriales (con frecuencia 440 V o más) y para las casas (240 y 120 V).

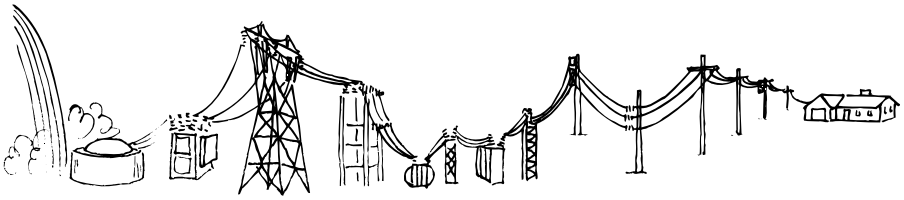


**FIGURA 25.16**
Transmisión de potencia.

Observa los transformadores en los postes eléctricos de tu vecindario. Son los intermediarios entre las estaciones eléctricas y cada uno de los consumidores; con frecuencia zumban cuando hacen su trabajo.

Entonces, la energía se transfiere de un sistema de alambres de conducción a otros mediante inducción electromagnética. Se necesita sólo un pequeño paso adicional para descubrir que los mismos principios explican la eliminación de los alambres y el envío de energía desde una antena radiotransmisora hasta un receptor de radio a muchos kilómetros de distancia. En la actualidad, los teléfonos móviles, las tabletas y todo tipo de aparatos electrónicos lo demuestran. Extiende estos principios sólo un pequeñísimo paso más, a la transformación de la energía de los electrones vibratorios en el Sol y a la energía de la vida sobre la Tierra. Los efectos de la inducción electromagnética son de muy largo alcance.

## 25.8 Inducción de campo

La inducción electromagnética explica la inducción de voltajes y corrientes. En realidad, los *campos* más básicos están en la raíz tanto de los voltajes como de las corrientes. La visión moderna de la inducción electromagnética es que los campos eléctrico y magnético son inducidos. Éstos, a su vez, producen los voltajes ya considerados. De modo que la inducción ocurre haya o no haya alambres o algún otro medio conductor. En este sentido más general, la ley de Faraday afirma:

**Un campo eléctrico se induce en cualquier región del espacio donde un campo magnético cambie con el tiempo.**

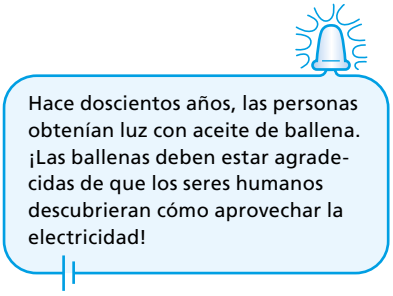
Existe un segundo efecto, una extensión de la ley de Faraday. Es lo mismo, excepto que los papeles de los campos eléctrico y magnético se intercambian. Es una de las muchas simetrías de la naturaleza. Este efecto fue anticipado por el físico británico James Clerk Maxwell alrededor de 1860 y se conoce como la **contraparte de Maxwell a la ley de Faraday**:

**Un campo magnético se induce en cualquier región del espacio donde un campo eléctrico cambie con el tiempo.**

En cada caso, la intensidad del campo inducido es proporcional a la tasa de cambio del campo inducido. Los campos eléctrico y magnético inducidos están en ángulo recto uno con respecto al otro.

Las ondas electromagnéticas rara vez interactúan entre sí. El espacio que te rodea está lleno de ondas de radio, señales de televisión, mensajes de teléfonos móviles y luz, y cada una "hace su propia labor" e ignora a todas las demás. Cuán afortunado eres.

[6]En la actualidad, las instalaciones eléctricas pueden transformar voltajes CD con el uso de la tecnología de semiconductores. Sigue de cerca los adelantos recientes en la tecnología de superconductores y espera los cambios resultantes en la transmisión de potencia.




Maxwell vio el vínculo entre las ondas electromagnéticas y la luz.[7] Si las cargas eléctricas se ponen a vibrar en el intervalo de frecuencias que coinciden con las de la luz, ¡se producen ondas que *son* luz! Maxwell descubrió que la luz son simplemente ondas electromagnéticas en el intervalo de frecuencias a las que el ojo es sensible.

Debido a la inducción electromagnética, la energía de los ríos elevados se ha aprovechado, convertido en electricidad y transportado a ciudades distantes. El advenimiento de los motores, los generadores y los transformadores ocurrió casi al mismo tiempo que se libraba la guerra civil estadounidense. Desde una perspectiva amplia de la historia de la humanidad, hay poca duda de que eventos como la Guerra de Secesión palidecen con una insignificancia provinciana frente al evento más significativo del siglo XIX: el descubrimiento y la aplicación de las leyes del electromagnetismo.

[7]En vísperas de su descubrimiento, cuenta la leyenda que Maxwell tenía una cita con una joven dama con quien se casaría después. Mientras caminaban por un jardín, su acompañante comentaba la belleza y maravilla de las estrellas. Maxwell le preguntó cómo se sentiría si supiera que caminaba al lado de la única persona en el mundo que sabía realmente qué era la luz de las estrellas. Y era cierto. En aquella época, James Clerk Maxwell era la única persona en el mundo que sabía que la luz de cualquier tipo es energía transportada en ondas de campos eléctricos y magnéticos que se regeneraban unos a otros de manera continua.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Inducción electromagnética.** Creación de voltaje cuando un campo magnético cambia con el tiempo. Si el campo magnético en el interior de una espira cerrada cambia en alguna forma, se induce un voltaje en la espira:

$$\text{Voltaje inducido} \sim \text{área de las espiras} \times \frac{\Delta \text{ campo magnético}}{\Delta \text{ tiempo}}$$

Éste es un enunciado de la ley de Faraday. (Si muchas espiras están conectadas juntas en una bobina, el voltaje inducido se multiplica por el número de espiras.) La inducción de voltaje en realidad es el resultado de un fenómeno más fundamental, por lo general, la inducción de un *campo* eléctrico.

**Ley de Faraday.** El voltaje inducido en una bobina es proporcional al producto del número de sus espiras, el área transversal de cada espira y la tasa a la que cambia el campo magnético en el interior de dichas espiras.

**Generador.** Dispositivo de inducción electromagnética que produce una corriente eléctrica cuando gira una bobina dentro de un campo magnético estacionario. Un generador convierte energía mecánica en energía eléctrica.

**Transformador.** Dispositivo que transfiere potencia eléctrica de una bobina de alambre a otra mediante inducción electromagnética, con el propósito de transformar un valor de voltaje en otro.

**Contraparte de Maxwell a la ley de Faraday.** Un campo magnético se crea en cualquier región del espacio en la que un campo eléctrico cambie con el tiempo. La magnitud del campo magnético inducido es proporcional a la tasa a la que cambia el campo eléctrico. La dirección del campo magnético inducido está en ángulo recto respecto del campo eléctrico variable.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 25.1 Inducción electromagnética

1. ¿Qué importante descubrimiento hicieron los físicos Michael Faraday y Joseph Henry?
2. ¿Qué debe cambiar para que en una bobina de alambre ocurra inducción electromagnética?

### 25.2 Ley de Faraday

3. Enuncia la ley de Faraday.
4. ¿Cuáles son las tres formas en las que puede inducirse voltaje en una espira de alambre?

### 25.3 Generadores y corriente alterna

5. ¿Cómo se relaciona la frecuencia del voltaje inducido con la frecuencia con la que un imán entra y sale de una bobina de alambre?
6. ¿Cuáles son las diferencias y semejanzas básicas entre un generador y un motor eléctrico?
7. ¿La corriente que produce un generador común es CA o CD?
8. ¿Cuál es la frecuencia común de la CA en las casas de Estados Unidos?

### 25.4 Producción de potencia

9. ¿Quién descubrió la inducción electromagnética y quién le dio un uso práctico?
10. ¿Qué es una armadura?
11. ¿Qué es lo que usualmente suministra la energía de entrada a una turbina?
12. ¿Es correcto decir que un generador produce energía? Defiende tu respuesta.
13. ¿Cuáles son las principales diferencias entre un generador MHD y un generador convencional?
14. ¿Un generador MHD emplea la ley de inducción de Faraday? Explica.

### 25.5 Transformadores

15. ¿Qué nombre recibe la tasa a la que se transfiere la energía?

16. ¿Es correcto decir que un transformador aumenta la energía eléctrica? Defiende tu respuesta.
17. ¿Cuál de los siguientes cambia un transformador: el voltaje, la corriente, la energía o la potencia?
18. ¿Cuál es la diferencia entre la entrada de potencia a un transformador eficiente y la salida de potencia?
19. ¿Exactamente qué reduce un transformador reductor?
20. En un transformador reductor, ¿cómo se compara la corriente de entrada, con la corriente de salida?
21. ¿Por qué un transformador necesita CA?
22. ¿Cuál es la principal ventaja de la CA sobre la CD?

### 25.6 Autoinducción

23. Cuando el campo magnético cambia en una bobina de alambre, se induce voltaje en cada espira de la bobina. ¿Se inducirá voltaje en una espira si la fuente del campo magnético es la misma bobina?

### 25.7 Transmisión de potencia

24. ¿Cuál es el propósito de transmitir potencia a altos voltajes a través de largas distancias?
25. ¿La transmisión de energía eléctrica necesita conductores eléctricos entre la fuente y el receptor? Cita un ejemplo para defender tu respuesta.

### 25.8 Inducción de campo

26. ¿Quién extendió la ley de Faraday para campos eléctricos variables?
27. ¿Qué induce la rápida alternancia de un campo magnético?
28. ¿Qué induce la rápida alternancia de un campo eléctrico?
29. En la manera como Maxwell ve la ley de Faraday, ¿se necesitan alambres?
30. ¿Cómo se llaman las ondas electromagnéticas en el intervalo de frecuencias que coinciden con lo que pueden ver los ojos?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

31. Escribe una carta a un pariente o un amigo y dile que descubriste cuál es la respuesta a lo que durante siglos ha sido un misterio: la naturaleza de la luz. Cuéntale cómo la luz se relaciona con la electricidad y el magnetismo.
32. Con un trozo de alambre, haz una bobina; quizás puedes enrollarla holgadamente alrededor del tubo de cartón de un rollo de papel de baño vacío. Quita el tubo. Une cada extremo del alambre a un galvanómetro. Mueve un imán de ida y vuelta dentro de la bobina y observa el movimiento de la aguja del galvanómetro. Luego aumenta el número de espiras y de nuevo observa la lectura del galvanómetro. Esto es en especial interesante si tienes imanes de diferentes intensidades con los que puedas jugar.
33. El campo magnético de la Tierra induce cierto grado de magnetismo en la mayoría de los objetos de hierro que están a tu alrededor. Con una brújula puedes ver que las latas de alimento de tu alacena tienen polos norte y sur. Cuando pasas la brújula de su parte inferior a la parte superior, puedes identificar con facilidad sus polos. Marca los polos N y S. Luego voltea las latas de cabeza y observa cuántos días tardan en invertir sus polos. Explica a tus amigos por qué los polos se invierten.
34. Suelta un pequeño imán de barra por un tubo vertical de plástico y observa su rapidez de caída. Luego haz lo mismo con un tubo de cobre. ¡Hala! ¿Por qué la diferencia?

## SUSTITUYE Y LISTO (FAMILIARIZACIÓN CON ECUACIONES)

$$\text{Relación del transformador} = \frac{\text{Voltaje primario}}{\text{Número de vueltas en el primario}} = \frac{\text{Voltaje secundario}}{\text{Número de vueltas en el secundario}}$$

35. El primario de un transformador conectado a 120 V tiene 10 vueltas. El secundario tiene 100 vueltas. Demuestra que el voltaje de salida es 1,200 V. Éste es un transformador elevador.
36. El primario de un transformador conectado a 120 V tiene 100 vueltas. El secundario tiene 10 vueltas. Demuestra que el voltaje de salida es 12 V. Éste es un transformador reductor.

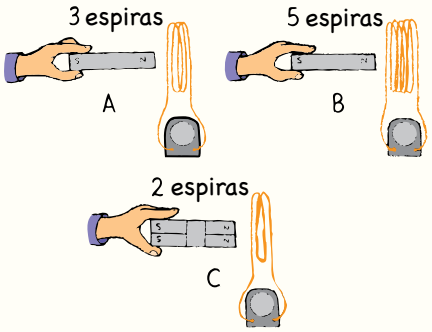
## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

37. Una consola de videojuegos necesita 6 V para funcionar de manera correcta. Un transformador permite que el dispositivo pueda alimentarse de un tomacorriente de 120 V. Si el primario tiene 500 vueltas, demuestra que el secundario debe tener 25 vueltas.
38. Un tren eléctrico de juguete necesita 6 V para funcionar. Cuando se conecta a un circuito doméstico de 120 V, se necesita un transformador. Si el embobinado primario del transformador tiene 360 vueltas, demuestra que el embobinado secundario debe tener 18 vueltas.
39. Un transformador para una laptop convierte una entrada de 120 V en una salida de 24 V. Demuestra que el embobinado primario tiene cinco veces más vueltas que el embobinado secundario.
40. Si la corriente de salida para el transformador del problema anterior es 1.8 A, demuestra que la corriente de entrada es 0.36 A.
41. Un transformador tiene una entrada de 6 V y una salida de 36 V. Si la entrada cambia a 12 V, demuestra que la salida sería 72 V.
42. Un transformador ideal tiene 50 vueltas en su primario y 250 vueltas en su secundario. Al primario se conecta una CA de 12 V. Demuestra que (a) en el secundario está disponible una CA de 60 V; (b) en un dispositivo de 10 Ω conectado al secundario hay 6 A de corriente, y (c) la potencia suministrada al primario es 360 W.
43. Las señales de neón necesitan aproximadamente 12,000 V para su funcionamiento. Considera el transformador de una señal de neón que opera en líneas de 120 V. ¿Cuántas vueltas de más debe haber en el secundario que en el primario?

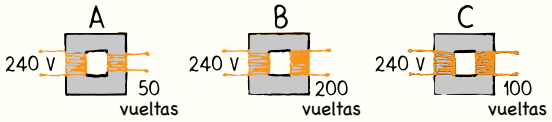
44. Una potencia de 100 kW ($10^5$ W) se suministra al otro lado de la ciudad mediante un par de líneas de transmisión, entre las cuales el voltaje es de 12,000 V. (a) Usa la fórmula $P = IV$ para demostrar que la corriente en las líneas es de 8.3 A. (b) Si cada una de las dos líneas tiene una resistencia de 10 Ω, demuestra que existe un cambio de voltaje de 83 V *a lo largo* de cada línea. (Piensa con cuidado. Este cambio de voltaje es a lo largo de cada línea, *no entre* las líneas.) (c) Demuestra que la potencia que se disipa como calor en ambas líneas, en conjunto, es de 1.38 kW (distinto de la potencia suministrada a los consumidores). (d) ¿Cómo es que tus cálculos apoyan la importancia de subir los voltajes con transformadores para la transmisión a larga distancia?

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

45. Imanes de barra se mueven dentro de bobinas de alambre en forma rápida e idéntica. El voltaje inducido en cada bobina provoca una corriente, como se indica en el galvanómetro. Ignora la resistencia eléctrica en las espiras de la bobina y clasifica, de mayor a menor, la lectura en el galvanómetro.




46. Cada uno de los transformadores mostrados es activado con 100 W, y todos tienen 100 vueltas en el primario. El número de vueltas en cada secundario varía como se indica.



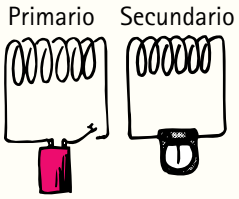

a. Clasifica las salidas de voltaje de los secundarios, de mayor a menor.
b. Clasifica las corrientes en los secundarios, de mayor a menor.
c. Clasifica las salidas de potencia en los secundarios, de mayor a menor.

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

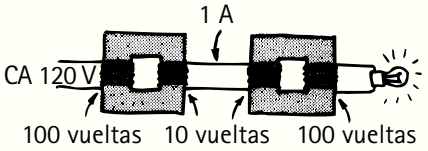
47. ¿Por qué en este capítulo la palabra *cambio* aparece con tanta frecuencia?
48. Una pastilla fonocaptora común para una guitarra consiste en una bobina de alambre alrededor de un pequeño imán permanente, como se describe en la Figura 25.5. ¿Por qué este tipo de pastilla fonocaptora no funcionará con cuerdas de nailon?
49. ¿Por qué un núcleo de hierro aumenta la inducción magnética de una bobina de alambre?
50. ¿Por qué la armadura y los devanados de campo de un motor eléctrico por lo general se devanan sobre un núcleo de hierro?
51. ¿Por qué la armadura de un generador es más difícil de girar cuando se conecta a un circuito y se suministra corriente eléctrica?
52. ¿Por qué un motor también tiende a actuar como un generador?
53. ¿Un ciclista viajará más lejos si la lámpara conectada al generador de su bicicleta se apaga? Explica.
54. Cuando un automóvil se mueve sobre una ancha espira de alambre cerrada, incrustada en la superficie del camino, ¿se altera el campo magnético de la Tierra dentro de la espira? ¿Se produce un pulso de corriente? ¿Puedes citar una aplicación práctica de esto en una intersección transitada?
55. En el área de seguridad, las personas caminan a través de una gran bobina de alambre y a través de un débil campo magnético CA. ¿Cuál es el resultado de que un pequeño trozo de metal en una persona altere un poco el campo magnético de la bobina?
56. Un trozo de cinta plástica recubierta con óxido de hierro está magnetizada más en algunas partes que en otras. Cuando la cinta pasa por una pequeña bobina de alambre, ¿qué ocurre en la bobina? ¿Cuál es la aplicación práctica de esto?
57. ¿Cómo difieren la dirección de la fuerza magnética y sus efectos entre el efecto motor y el efecto generador, como se muestra en la Figura 25.7?
58. Cuando giras con la mano el eje de un motor eléctrico, ¿qué ocurre en el interior de las bobinas de alambre?
59. Tu amigo dice que, si giras con la mano el eje de un motor CD, el motor se convierte en un generador CD. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?
60. ¿La salida de voltaje aumenta cuando un generador se hace girar más rápido? Defiende tu respuesta.
61. Si colocas un anillo metálico en una región donde un campo magnético alterna en forma rápida, el anillo puede ponerse muy caliente al tacto. ¿Por qué?
62. Un mago coloca un anillo de aluminio sobre una mesa con un electroimán oculto bajo ella. Cuando el mago dice "abracadabra" (y presiona un interruptor que activa una corriente que fluye por la bobina bajo la mesa), el anillo salta en el aire. Explica este "truco".
63. En una de las fotografías al inicio del capítulo, Jean Curtis pregunta a sus alumnos por qué el anillo de cobre levita alrededor del núcleo de hierro del electroimán. ¿Cuál es la explicación, y esto involucra CA o CD?
64. ¿Cómo podría encenderse una bombilla cerca de un electroimán, mas no en contacto con él? ¿Se necesita CA o CD? Defiende tu respuesta.
65. Un trozo de alambre se dobla en una espira cerrada y un imán se inserta en él, lo que induce un voltaje y, en consecuencia, una corriente en el alambre. Un segundo trozo de alambre, el doble de largo, se dobla en dos

espiras de alambre, y un imán se inserta de igual forma en él. Se induce el doble de voltaje, pero la corriente es la misma que la producida en la espira sencilla. ¿Por qué?

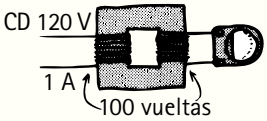
66. Dos bobinas de alambre, separadas pero similares, se montan una cerca de la otra, como se muestra. La primera bobina se conecta a una batería. La segunda bobina se conecta a un galvanómetro. (a) ¿Cómo responde el galvanómetro cuando se cierra el interruptor en el primer circuito? (b) Después de cerrarse, ¿cómo responde el medidor cuando la corriente es estable? (c) ¿Cómo responde el medidor cuando se abre el interruptor?




67. ¿Por qué se inducirá más voltaje con el aparato mostrado antes, si en las bobinas se inserta un núcleo de hierro?
68. ¿Por qué el transformador no funcionará si usas CD?
69. ¿Cómo se compara la corriente en el secundario de un transformador, con la corriente en el primario, cuando el voltaje secundario es el doble que el voltaje primario?
70. ¿En qué sentido un transformador puede considerarse una palanca eléctrica? ¿Qué multiplica? ¿Qué *no* multiplica?
71. ¿Cuál es la principal diferencia entre un transformador elevador y un transformador reductor?
72. ¿Por qué suele escucharse un zumbido cuando un transformador está funcionando?
73. ¿Por qué un transformador no funciona con corriente directa? ¿Por qué se necesita CA?
74. ¿Por qué es importante que el núcleo de un transformador pase a través de ambos embobinados?
75. ¿Los embobinados primario y secundario en un transformador están físicamente unidos, o hay espacio entre los dos? Explica.
76. Una fuente CA de 120 volts activa el circuito que se muestra. ¿Cuántos volts pasan por la bombilla y cuántos amperes fluyen por ella?




77. En el circuito mostrado, ¿cuántos volts pasan a través del medidor y cuántos amperes fluyen a través de él?




78. ¿Cómo responderías la pregunta anterior si la entrada fuera 12 V de CA?
79. ¿Un transformador eficiente puede incrementar la energía? Defiende tu respuesta.
80. Si un imán de barra se suelta en el interior de una bobina de alambre de alta resistencia, éste frenará. ¿Por qué?
81. Se sabe que la fuente de una onda sonora es un objeto en vibración. ¿Cuál es la fuente de una onda electromagnética?
82. Sin imanes en el vecindario, ¿por qué razón fluirá corriente en una gran bobina de alambre sacudida en el aire?
83. ¿Qué le hace una onda de radio incidente a los electrones en una antena receptora?
84. ¿Cómo supones que se compara la frecuencia de una onda electromagnética, con la frecuencia de los electrones que pone a oscilar en una antena receptora?
85. Un amigo dice que el cambio de los campos eléctrico y magnético hace que éstos se generen mutuamente y que esto da origen a luz visible cuando la frecuencia del cambio coincide con las frecuencias de la luz. ¿Estás de acuerdo? Explica.
86. ¿Las ondas electromagnéticas existirían si los campos magnéticos variables pudieran producir campos eléctricos pero los campos eléctricos variables, a su vez, no pudieran producir campos magnéticos? explica.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

87. La esposa de Joseph Henry donó parte de su vestido de bodas de seda para cubrir los alambres de los electroimanes de Joseph. ¿Cuál fue el propósito del recubrimiento de seda?
88. Un determinado detector de sismos simple consiste en una pequeña caja firmemente anclada a tierra. Suspendido dentro de la caja hay un imán masivo, rodeado por bobinas de alambre estacionarias unidas a la caja. Para explicar cómo funciona este dispositivo, aplica dos importantes principios de física: uno del Capítulo 2 y el otro de este capítulo.
89. Una sierra eléctrica que funciona con rapidez normal extrae una corriente relativamente pequeña. Pero si un pedazo de madera aserrado se atasca y el eje del motor no gira, la corriente aumenta de manera sorprendente y el motor se sobrecalienta. ¿Por qué?
90. Tu amigo dice que, de acuerdo con la ley de Ohm, un alto voltaje produce una alta corriente. Luego, tu amigo pregunta: "entonces, en una línea de transmisión, ¿cómo puede transmitirse la potencia a alto voltaje y *baja* corriente?". ¿Cuál es tu respuesta iluminadora?
91. Tu instructor de física suelta un imán por un largo tubo de cobre vertical y el imán se mueve de manera lenta en comparación con la caída de un objeto no magnetizado. Ofrece una explicación.
92. Este ejercicio es similar al anterior. ¿Por qué un imán de barra caerá más lento y alcanzará una velocidad terminal en un tubo vertical de cobre o aluminio, pero no en un tubo de cartón?
93. Si bien el cobre y el aluminio no son magnéticos, ¿por qué una hoja de alguno de estos metales es más difícil de pasar entre los polos de un imán que una hoja de cartón?
94. Una barra metálica, pivoteada en un extremo, oscila libremente en ausencia de un campo magnético. Pero cuando oscila entre los polos de un imán, sus oscilaciones se amortiguan en forma rápida. ¿Por qué? (Tal amortiguamiento magnético se utiliza en varios dispositivos prácticos.)
95. El ala metálica de un avión actúa como un "alambre" que vuela a través del campo magnético de la Tierra. Entre las puntas de las alas se induce un voltaje, y una corriente fluye a lo largo del ala, pero sólo durante breve tiempo. ¿Por qué la corriente se detiene aun cuando el avión sigue volando a través del campo magnético de la Tierra?
96. ¿Qué está mal con este esquema? Para generar electricidad sin combustible, arregla un motor para que haga funcionar un generador que produzca electricidad que se incremente con transformadores, de modo que el generador pueda hacer funcionar el motor y, de manera simultánea, suministre electricidad para otros usos.

# PARTE CINCO Examen de práctica de opción múltiple

*Elige la MEJOR respuesta a cada una de las siguientes:*

1. La fuerza de atracción eléctrica entre un electrón y un protón es mayor sobre el
   (a) protón. (b) electrón.
   (c) Ninguno; ambas son iguales.
2. Cuando te cepillas el cabello y quitas electrones del mismo, la carga de tu cabello se vuelve
   (a) positiva. (c) Ambas.
   (b) negativa. (d) Ninguna de las anteriores.
3. De acuerdo con Coulomb, un par de partículas cargadas colocadas el doble de cerca una de otra experimenta una fuerza
   (a) el doble de intensa. (c) la mitad de intensa.
   (b) cuatro veces más intensa. (d) un cuarto de intensa.
4. Cuando compras una tubería en un almacén, el agua no está incluida. Cuando compras alambre de cobre, los electrones
   (a) debes suministrarlos tú.
   (b) están incluidos en el alambre.
   (c) pueden caerse… de ahí el aislamiento.
   (d) Ninguno de los anteriores.
5. Inmediatamente después de que dos partículas cargadas separadas se sueltan desde el reposo, ambas aumentan su *rapidez*. En consecuencia, el signo de la carga de las partículas es
   (a) el mismo. (c) Cualquiera de éstos.
   (b) opuesto. (d) Se necesita más información.
6. Inmediatamente después de que dos partículas cargadas separadas se sueltan desde el reposo, ambas aumentan su *aceleración*. En consecuencia, el signo de la carga de las partículas es
   (a) el mismo. (c) Cualquiera de éstos.
   (b) opuesto. (d) Se necesita más información.
7. El campo eléctrico entre un par de placas paralelas con carga opuesta
   (a) se hace más débil con la distancia dentro de las placas.
   (b) sigue la ley del inverso al cuadrado.
   (c) Ambos.
   (d) Ninguno de los anteriores.
8. Un capacitor puede almacenar
   (a) carga. (c) Ambos.
   (b) energía. (d) Ninguno de los anteriores.
9. El campo eléctrico dentro del domo de un generador Van de Graaff es cero cuando el domo está
   (a) cargado. (c) Cualquiera de éstos.
   (b) descargado. (d) Ninguno de los anteriores.
10. La energía potencial de un resorte comprimido y la energía potencial de un objeto cargado dependen ambas de
    (a) el trabajo realizado sobre ellos. (c) Ambos.
    (b) el movimiento. (d) Ninguno de los anteriores.
11. Para recibir un choque eléctrico debe haber
    (a) una corriente en una dirección.
    (b) presencia de humedad.
    (c) alto voltaje y baja resistencia corporal.
    (d) diferencia de voltaje a través de parte o todo tu cuerpo.
12. Un resistor de 10 Ω porta 10 A. El voltaje a través del resistor es
    (a) 0. (c) 10 V.
    (b) más que 0 pero menos que 10 V. (d) más que 10 V.
13. Si la corriente en el filamento de una lámpara es de 3 A, la corriente en el alambre de conexión es
    (a) menos que 3 A. (c) más que 3 A.
    (b) 3 A. (d) No hay suficiente información para decirlo.
14. La diferencia entre CD y CA en los circuitos eléctricos es que, en la CD, las cargas fluyen
    (a) de manera estable en una dirección. (c) de ida y vuelta.
    (b) en una dirección. (d) Todas las anteriores.
15. A medida que más lámparas se conectan a un circuito en serie, la corriente en la fuente de poder
    (a) aumenta. (c) permanece igual.
    (b) disminuye. (d) Ninguno de los anteriores.
16. En un circuito en serie, si la corriente en una lámpara es 2 A, la corriente en la lámpara junto a ella es
    (a) la mitad, 1 A. (c) Depende de cuál lámpara esté más cerca de la batería.
    (b) 2 A. (d) No hay suficiente información para decirlo.
17. A medida que más lámparas se conectan en paralelo en un circuito, la corriente en la fuente de poder
    (a) aumenta. (c) permanece igual.
    (b) disminuye. (d) No hay suficiente información para decirlo.
18. En un circuito de dos lámparas en paralelo, si la corriente en una lámpara es 2 A, la corriente en la otra lámpara es
    (a) aproximadamente 1 A.
    (b) 2 A.
    (c) Depende de cuál lámpara esté más cerca de la batería.
    (d) No hay suficiente información para decirlo.
19. Un electrón puede acelerarse mediante
    (a) un campo eléctrico. (c) Ambos.
    (b) un campo magnético. (d) Ninguno de los anteriores.
20. Las líneas de campo magnético que rodean un alambre portador de corriente forman
    (a) círculos. (c) corrientes parásitas.
    (b) líneas radiales. (d) bucles de energía.
21. Una fuerza magnética puede actuar sobre un electrón aun cuando
    (a) esté en reposo.
    (b) se mueva paralelo a las líneas del campo magnético.
    (c) Ambos.
    (d) Ninguno de los anteriores.
22. Una fuerza magnética que actúa sobre un haz de electrones puede cambiar su
    (a) dirección. (c) Ambos.
    (b) energía. (d) Ninguno de los anteriores.
23. Un galvanómetro puede calibrarse para leer
    (a) corriente eléctrica. (c) Ambos.
    (b) voltaje eléctrico. (d) Ninguno de los anteriores.
24. Un motor y un generador son
    (a) dispositivos similares. (c) formas de transformadores.
    (b) dispositivos muy diferentes. (d) fuentes de energía.
25. Los detectores de metales por los que pasan las personas en los aeropuertos funcionan de acuerdo con
    (a) la ley de Ohm. (c) la ley de Coulomb.
    (b) la ley de Faraday. (d) las leyes de Newton.
26. Si cambias el campo magnético en una espira de alambre cerrada, lo que se crea en la espira es
    (a) una corriente. (c) un campo eléctrico.
    (b) un voltaje. (d) Todos los anteriores.
27. En una espira de alambre se inducirá un voltaje cuando el campo magnético dentro de dicha espira
    (a) cambie.
    (b) se alinee con el campo eléctrico.
    (c) esté en ángulo recto con el campo eléctrico.
    (d) se convierta a energía magnética.
28. Un transformador elevador en un circuito eléctrico puede elevar
    (a) el voltaje. (c) Ambos.
    (b) la energía. (d) Ninguno de los anteriores.
29. Comparada con la entrada de potencia, la salida de potencia de un transformador ideal es
    (a) mayor.
    (b) menor.
    (c) la misma.
    (d) Cualquiera de los anteriores.
30. Electricidad y magnetismo se conectan para formar
    (a) masa. (c) sonido de ultraalta frecuencia.
    (b) energía. (d) luz.

*Después* de hacer elecciones razonadas, y discutirlas con tus amigos, encuentra las respuestas en las páginas S-1.

PARTE SEIS

# Luz

Qué bello es que fotones energéticos de la luz solar estimulen vibraciones de incontables electrones en la estructura molecular de esta hoja. Algunas de las vibraciones producen calor, en tanto que otras sacan nuevos fotones, lo que revela la transparente y delicada estructura de la hoja con intrincado detalle. Y los fotones no vibran a cualquier frecuencia, ¡caramba! Se contonean a un ritmo promedio de $6 \times 10^{14}$ vibraciones por segundo, ¡razón por la cual la hoja es verde!

26

CAPÍTULO 26

# Propiedades de la luz


26.1 Ondas electromagnéticas

26.2 Velocidad de una onda electromagnética

26.3 El espectro electromagnético

26.4 Materiales transparentes

26.5 Materiales opacos

26.6 Viendo la luz: el ojo

**1** Vista desde la estación espacial MIR de un eclipse solar en la Tierra. **2** Bob y Leslie Abrams (mi hija) ayudan a Dave Wall con un experimento de óptica. **3** Las manchas de luz sobre la pared, el suelo y sobre el autor del manual de laboratorio Dean Baird son imágenes del Sol proyectadas a través de pequeñas aberturas entre las hojas de los árboles cercanos. **4** Durante un eclipse parcial de Sol (cuando la Luna cubre parte del Sol en el cielo), las imágenes solares son crecientes. **5** Durante un eclipse anular, la Luna se alinea con el Sol, pero no lo cubre por completo, lo que resulta en círculos solares rara vez vistos, como lo demuestra Paul Doherty durante el eclipse anular de 2012, que transitó por el occidente de Estados Unidos.

James Clerk Maxwell, quien nació en 1831, fue un matemático y físico teórico escocés. Sus padres no se conocieron ni casaron sino hasta entrados los 30 años de edad, cosa muy rara en la época, y su madre tenía casi 40 cuando nació James. Fue el único hijo sobreviviente, pues su hermana mayor murió en la infancia.

Maxwell tuvo una curiosidad insaciable desde muy temprana edad. Su madre reconoció su potencial y asumió la responsabilidad de su educación inicial, que en la época victoriana era una tarea que recaía, sobre todo, en la mujer de la casa. Por desgracia, ella murió de cáncer abdominal cuando Maxwell tenía sólo ocho años de edad. Entonces su educación la supervisó su padre, quien contrató a un tutor de 16 años de edad para el joven Maxwell. El tutor lo trataba con severidad y lo amonestaba por ser lento y caprichoso. Después de que su padre despidió al tutor, Maxwell fue enviado a la prestigiosa Academia de Edimburgo.

Maxwell, con 10 años de edad, criado en soledad en la finca rural de su padre, no se adaptó a la escuela. Sin lugar en la clase de primer año, fue obligado a incorporarse a la clase de segundo año, con compañeros un año más grandes que él. Para los demás chicos, la manera de conducirse y el acento de Galloway eran rústicos, y cuando llegó en su primer día de clases vistiendo zapatos y túnica hechos en casa se ganó el nada agradable apodo de "tontito". Sin embargo, Maxwell nunca pareció resentir el epíteto, y lo soportó sin quejas durante muchos años.

A una edad temprana, Maxwell quedó fascinado por la geometría. Su trabajo académico permaneció común y corriente hasta que, a la edad de 13 años, ganó la medalla matemática de la escuela y los primeros lugares en inglés y poesía. A los 14, Maxwell escribió un ensayo que describía un medio mecánico para dibujar curvas matemáticas con un pedazo de cordel y las propiedades de las curvas con dos o más focos. Su genio quedó demostrado en este trabajo de las "curvas ovales", que fue presentado a la Royal Society de Edimburgo, mas no por Maxwell. Debido a que era considerado demasiado joven, confió el ensayo a un profesor de filosofía natural de la Universidad de Edimburgo.

Maxwell dejó la Academia de Edimburgo a los 16 años y comenzó a tomar clases en la Universidad de Edimburgo. Tuvo la oportunidad de asistir a Cambridge después de su primer curso, pero prefirió concluir sus estudios de pregrado en la universidad local. Pronto, Maxwell consideró que sus clases eran poco exigentes y se sumergió en el estudio privado durante su tiempo libre en la universidad, y en particular durante sus visitas a casa. Ahí experimentó con aparatos químicos y electromagnéticos improvisados. Su principal preocupación en esa época era la luz polarizada. Construyó bloques de gelatina y los sometió a varios esfuerzos, y con un par de prismas polarizadores observó las franjas coloreadas que aparecían en la gelatina. Maxwell había descubierto la fotoelasticidad, un medio para determinar la distribución de esfuerzos dentro de estructuras físicas.

A los 18, Maxwell escribió dos artículos para la *Royal Society* de Edimburgo. Aunque el trabajo era impresionante, como con su ensayo escolar sobre las curvas ovales, se le consideró demasiado joven para pararse en el estrado y hacer la presentación él mismo. Los ensayos de Maxwell fueron presentados por su tutor.

En octubre de 1850, ya como un matemático consumado, Maxwell abandonó Escocia para dirigirse a la University of Cambridge y pronto se unió al Trinity College, donde en 1854 se graduó con un título en matemáticas. Maxwell decidió permanecer en Trinity después de graduarse y, aparte de las asesorías y labores docentes, se dedicó a sus intereses científicos en áreas como color, hidrostática, óptica y los anillos de Saturno, todo a su propio ritmo.

En 1859, después de mudarse al Marischal College, en Aberdeen, Escocia, Maxwell se casó con Katherine Mary Dewar, la hija del rector del colegio. En ese mismo año, ganó un premio por concluir que los anillos de Saturno consistían en pequeñas partículas, una conclusión verificada más de un siglo después, en la era espacial. Maxwell tuvo un episodio casi letal de viruela poco después y se dirigió al sur, a Londres, con su esposa. Aceptó un puesto en el King's College, lo que resultó ser el periodo más productivo de su carrera. Ahí mostró la primera fotografía a color del mundo y desarrolló ideas acerca de la viscosidad de los gases. Sin embargo, su logro más significativo fue el desarrollo de la teoría electromagnética, que sintetizaba en una teoría consistente todas las observaciones, experimentos y ecuaciones de electricidad, magnetismo e incluso óptica que antes no guardaban ninguna relación. Alrededor de 1862, calculó que la rapidez de propagación de un campo electromagnético es aproximadamente la rapidez de la luz. Escribió: "Apenas podemos evitar concluir que la luz consiste en las ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos".

Después de la obra de Newton, que primero unificó la mecánica, la obra de Maxwell sobre el electromagnetismo se ha llamado la "segunda gran unificación en física". Maxwell murió de cáncer abdominal a los 48 años de edad.

La luz es la única cosa que se ve. El sonido es la única cosa que se escucha.

## 26.1 Ondas electromagnéticas

Recuerda del Capítulo 25 que Maxwell descubrió que la luz es la oscilación de los campos eléctrico y magnético. Sabes que si sacudes el extremo de una varita en agua calma, producirás ondas sobre la superficie del agua. Maxwell enseñó que, si del mismo modo sacudes una barra con carga eléctrica en el espacio vacío, producirás ondas en el espacio. Los campos eléctrico y magnético vibratorios se regeneran mutuamente y constituyen una **onda electromagnética**, que emana (sale) de la carga en vibración. Resulta que sólo hay una rapidez para la cual los campos eléctrico y magnético permanecen en equilibrio perfecto, lo que refuerza a cada uno conforme portan energía por el espacio. A continuación verás por qué esto es así.

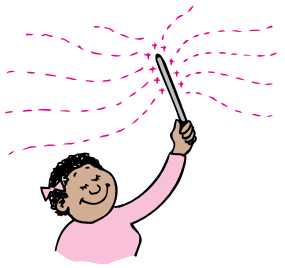


**FIGURA 26.1**
Sacude un objeto con carga eléctrica y producirás una onda electromagnética.

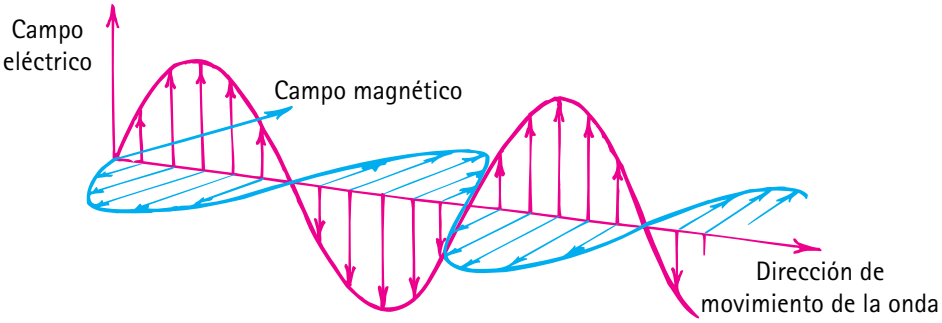



**FIGURA 26.2**
Los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética son perpendiculares entre sí y perpendiculares con respecto a la dirección de movimiento de la onda.

**pti**

- El estudio de la luz comienza con la investigación de sus propiedades electromagnéticas. En el Capítulo 27 estudiarás su apariencia: el color. En el Capítulo 28 aprenderás cómo se comporta la luz: cómo se refleja y refracta. Luego conocerás su naturaleza ondulatoria en el Capítulo 29, y su naturaleza cuántica, en los Capítulos 30 y 31.

## 26.2 Velocidad de una onda electromagnética

A diferencia de otros objetos en movimiento, las ondas electromagnéticas que viajan por el espacio libre nunca cambian de rapidez. Esto tiene que ver con la inducción electromagnética y la conservación de energía. Si la luz frenara, su campo eléctrico variable generaría un campo magnético más débil, el cual, a su vez, generaría un campo eléctrico más débil, y así sucesivamente, hasta que la onda muriera. Se perdería energía y nada se transportaría de un lugar a otro. De modo que la luz no puede viajar más lento de lo que lo hace.

Si la luz acelerara, el campo eléctrico variable generaría un campo magnético más intenso, el cual, a su vez, generaría un campo eléctrico más intenso, y así sucesivamente; un *crescendo* de intensidad de campo siempre creciente y de energía siempre creciente, lo que, por supuesto, infringe la ley de conservación de la energía. Sólo a una rapidez la inducción mutua continúa de manera indefinida, y transporta energía hacia adelante sin pérdida o ganancia. A partir de sus ecuaciones de inducción electromagnética, Maxwell calculó el valor de esta rapidez crucial y descubrió que era de 300,000 kilómetros por segundo. En sus cálculos, utilizó sólo las constantes en sus ecuaciones que fueron determinadas mediante experimentos sencillos de laboratorio con campos eléctricos y magnéticos. No *usó* la rapidez de la luz. ¡Él *encontró* la rapidez de la luz!

Maxwell pronto se dio cuenta de que había descubierto la solución a uno de los más grandes misterios del Universo: la naturaleza de la luz. Descubrió que la luz es tan sólo radiación electromagnética dentro de un rango de frecuencia particular, $4.3 \times 10^{14}$ a $7 \times 10^{14}$ vibraciones por segundo. Tales ondas activan la "antena eléctrica" en la retina del ojo. Las ondas de frecuencia más baja parecen rojas, y las ondas con frecuencia más alta parecen violetas.[1] Maxwell se dio cuenta, al mismo tiempo, de que la radiación electromagnética de *cualquier* frecuencia se propaga con la misma rapidez que la luz.

Maxwell, "con su propio pensamiento", calculó la rapidez de la luz. Unos 100 años después, en 1969, millones de personas que observaban por televisión el primer aterrizaje en la Luna escucharon las conversaciones entre los astronautas y el control de misión en la Tierra. Cuando los observadores percibieron una clara demora temporal entre los mensajes, escucharon el efecto de la rapidez de Maxwell "con sus propios oídos".

[1]Es habitual describir el sonido y las ondas de radio por su *frecuencia* y la luz por su *longitud de onda*. Sin embargo, en este libro, se prefiere el concepto único de frecuencia para describir la luz.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿De qué principio central en física es una consecuencia la invariable rapidez de las ondas electromagnéticas en el espacio?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La conservación de la energía.

**SCREENCAST: Rapidez de la luz**

## 26.3 El espectro electromagnético

En el vacío, todas las ondas electromagnéticas se mueven con la misma rapidez y difieren una de otra en su frecuencia. La clasificación de las ondas electromagnéticas de acuerdo con su frecuencia es el **espectro electromagnético** (Figura 26.3). Se han detectado ondas electromagnéticas con una frecuencia de apenas 0.01 hertz (Hz). Las ondas electromagnéticas con frecuencias de varios miles de hertz (kHz) se clasifican como ondas de radio de muy baja frecuencia. Un millón de hertz (MHz) se encuentra en medio de la banda

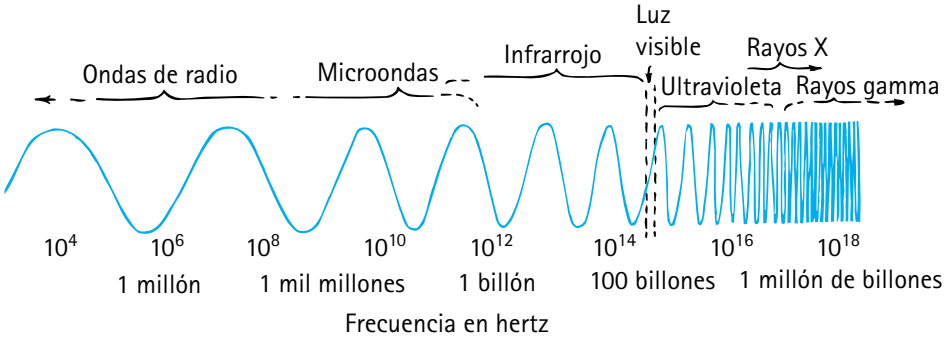
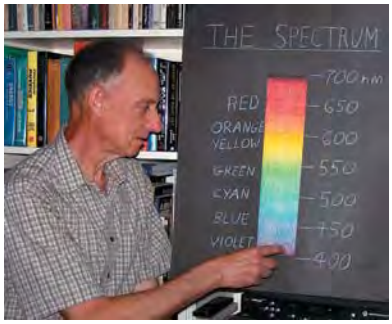



**FIGURA 26.3**

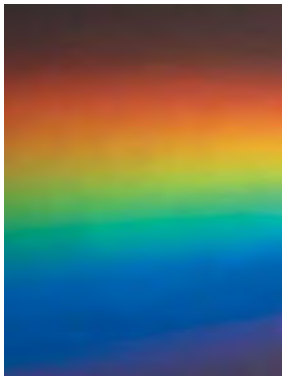
El espectro electromagnético es un intervalo continuo de ondas que se extienden desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. Los nombres descriptivos de las secciones son sólo una clasificación histórica, porque todas las ondas son iguales en naturaleza y difieren principalmente en su frecuencia y su longitud de onda; todas viajan con la misma rapidez.

de radio AM. La banda de ondas de televisión de muy alta frecuencia (VHF) comienza en alrededor de 50 MHz, y las ondas de radio FM están entre 88 MHz y 108 MHz. Los teléfonos celulares funcionan en 800 MHz o en 1,900 MHz. Luego vienen las frecuencias ultraaltas (UHF), seguidas de las microondas, más allá de las cuales están las ondas infrarrojas, que suelen denominarse "ondas de calor". Todavía más lejos está la luz visible, que constituye menos de una millonésima del 1% del espectro electromagnético medido. La frecuencia más baja de luz visible para tus ojos parece roja. Las frecuencias más altas de luz visible, que tienen casi el doble de frecuencia de la luz roja, parecen violetas. Las frecuencias todavía más altas son ultravioletas. Estas ondas de frecuencia más alta producen quemaduras solares. Las frecuencias más altas que rebasan las ultravioleta están en las regiones de los rayos X y los rayos gamma. No hay fronteras precisas entre las regiones, que en realidad se traslapan entre sí. El espectro se divide en estas regiones arbitrarias para clasificarlas.

Los conceptos y relaciones abordados antes en el estudio del movimiento ondulatorio (revisa el Capítulo 19) se aplican aquí. Recuerda que la frecuencia de una onda es la misma que la frecuencia de la fuente vibratoria que crea la onda. Del mismo modo, la frecuencia de una onda electromagnética cuando vibra por el espacio es idéntica a la frecuencia de la carga eléctrica oscilatoria que la genera.[2] Diferentes frecuencias corresponden




(a)



(b)

**FIGURA 26.4**

(a) Bruce Novak creó este auxiliar pedagógico para mostrar a sus alumnos de qué manera los colores del espectro se mezclan de uno al otro. (b) Él fotografió este espectro, que muestra mejor la mezcla de colores.

[2]Ésta es una regla de la física clásica, válida cuando las cargas oscilan sobre dimensiones que son grandes comparadas con el tamaño de un solo átomo (por ejemplo, en una antena de radio). La física cuántica permite excepciones. La radiación emitida por un solo átomo o molécula puede diferir en frecuencia de la frecuencia de la carga oscilatoria dentro del átomo o molécula.

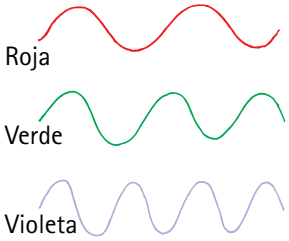



**FIGURA 26.5**
Longitudes de onda relativas de luz roja, verde y violeta. La luz violeta tiene casi el doble de frecuencia que la luz roja y la mitad de longitud de onda.

a diferentes longitudes de onda: ondas con frecuencias bajas tienen longitudes de onda largas, y ondas con frecuencias altas tienen longitudes de onda cortas. Por ejemplo, dado que la rapidez de la onda es 300,000 km/s, una carga eléctrica que oscila una vez por segundo (1 Hz) producirá una onda con una longitud de onda de 300,000 km. Esto es así porque en 1 segundo sólo se genera una longitud de onda. Si la frecuencia de oscilación fuese 10 Hz, entonces en 1 segundo se formarían 10 longitudes de onda, y la longitud de onda correspondiente sería de 30,000 km. Una frecuencia de 10,000 Hz produciría una longitud de onda de 30 km. De modo que, cuanto mayor sea la frecuencia de la carga que vibra, más corta será la longitud de onda de la energía radiante.[3]

Uno tiende a pensar en el espacio como vacío, pero sólo porque no es posible ver los montajes de ondas electromagnéticas que permean cada región de su entorno. Desde luego, algunas de estas ondas se ven como luz. Estas ondas constituyen sólo una microporción del espectro electromagnético. Tú no eres consciente de las ondas de radio y de telefonía celular que te engullen en todo momento. Los electrones libres en cada pedazo de metal sobre la superficie de la Tierra bailan de manera continua al ritmo de estas ondas. Se menean al unísono con los electrones que suben y bajan por una antena de transmisión. Un receptor de radio o televisión es simplemente un dispositivo que ordena y amplifica estas pequeñas corrientes. En todas partes existe radiación. La primera impresión del Universo es una de materia y vacío, pero en realidad el Universo es un denso mar de radiación ocupado sólo de manera ocasional por motitas de materia.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Es correcto decir que una onda de radio es una onda luminosa de baja frecuencia? ¿Y que una onda de radio también es una onda sonora?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

Sí y no. Tanto una onda de radio como una onda de luz son ondas electromagnéticas emitidas por electrones en vibración; las ondas de radio tienen frecuencias más bajas que las ondas de luz, de modo que una onda de radio puede considerarse una onda luminosa de baja frecuencia (y una onda de luz, de igual forma, puede considerarse una onda de radio de alta frecuencia). Pero una onda sonora es una vibración mecánica de la materia y fundamentalmente es diferente de una onda electromagnética. De modo que una onda de radio, en definitiva, no es una onda sonora.

## ANTENAS FRACTALES

Para obtener una recepción de calidad de ondas electromagnéticas, una antena convencional debe tener un largo aproximado de un cuarto de longitud de onda. Es por esto que, en los primeros dispositivos móviles, tenían que sacarse las antenas antes de usar el dispositivo. Nathan Cohen, un profesor de la Boston University, tenía problemas con una reglamentación de Boston que en la época prohibía el uso de antenas externas grandes sobre los edificios. De modo que, para diseñar una pequeña antena, dobló papel de aluminio en una forma fractal compacta (una figura Van Koch; busca *fractal* en Internet). Funcionó. Entonces diseñó y patentó muchas antenas fractales prácticas, como hizo Carles Puente, un inventor de España. Ambos formaron compañías de antenas fractales.

Los fractales son formas fascinantes que pueden separarse en partes, cada una de las cuales es (o se aproxima a) una copia reducida del conjunto. En cualquier fractal, formas similares aparecen en todos los niveles de amplificación. Algunos fractales que suelen observarse en la naturaleza son los copos de nieve, las nubes, los relámpagos, las líneas costeras e incluso una coliflor y un brócoli.

La antena fractal, al igual que otros fractales, tiene una forma que se repite. Debido a su diseño autosimilar plegado, una antena fractal puede comprimirse y acomodarse en el cuerpo del dispositivo; también puede funcionar de manera simultánea a diferentes frecuencias. En consecuencia, la misma antena puede usarse para conversaciones con teléfono móvil, así como para navegación GPS.

Qué bueno que estos dispositivos quepan en tu bolsillo. ¡Que vivan las antenas fractales compactas!

[3]La relación es $c = f\lambda$, donde $c$ es la rapidez de onda (constante), $f$ es la frecuencia y $\lambda$ es la longitud de onda.

## 26.4 Materiales transparentes

Cuando la luz se transmite a través de la materia, algunos de los electrones de la materia son forzados a ponerse en vibración. De esta forma, las vibraciones en el emisor se transmiten a vibraciones en el receptor. Esto es similar a la forma en la que se transmite el sonido (Figura 26.6).

**FIGURA 26.6**
De la misma manera como una onda sonora puede forzar a un receptor sonoro a ponerse en vibración, una onda de luz puede forzar a los electrones de los materiales para que se pongan en vibración.

La forma en que un material receptor responde cuando la luz incide sobre él depende de la frecuencia de la luz y de la frecuencia natural de los electrones en el material. La luz visible vibra a una frecuencia muy alta, más de 100 billones de veces por segundo (más de $10^{14}$ Hz). Para que un objeto cargado responda a estas vibraciones ultrarrápidas, debe tener muy poca inercia. Puesto que la masa de los electrones es muy pequeña, pueden vibrar a esta tasa.

Los átomos son como diapasones ópticos que resuenan a ciertas frecuencias.

Materiales como el vidrio y el agua permiten que la luz pase a través de ellos en líneas rectas. Se dice que son **transparentes** a la luz. Para entender cómo viaja la luz a través de un material transparente, imagina que los electrones en los átomos de los materiales transparentes estuvieran conectados a los núcleos mediante resortes (Figura 26.7).[4] Cuando una onda de luz incide sobre ellos, los electrones se ponen en vibración.

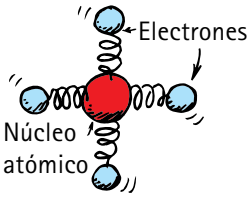



**FIGURA 26.7**
Modelo de resortes de la luz. Los electrones de los átomos en el vidrio tienen ciertas frecuencias de vibración naturales y se comportan como si estuvieran conectados al núcleo atómico con resortes.

Los materiales que son elásticos responden más a vibraciones con determinadas frecuencias que con otras (consulta el Capítulo 20). Las campanas tañen a una frecuencia particular, los diapasones vibran a una frecuencia particular, y así lo hacen los electrones de los átomos y moléculas. Las frecuencias naturales de vibración de un electrón dependen de qué tan unido esté a su átomo o molécula. Diferentes átomos y moléculas tienen diferentes "intensidades de resorte". Los electrones en los átomos de vidrio tienen una frecuencia de vibración natural en el rango del ultravioleta. Por tanto, cuando las ondas ultravioletas inciden sobre el vidrio, ocurre resonancia y la vibración de los electrones se incrementa hasta alcanzar grandes amplitudes, de la misma manera como empujar a alguien a la frecuencia resonante de un columpio genera una gran amplitud. La energía recibida por cualquier átomo de vidrio se vuelve a emitir o se transmite a los átomos vecinos mediante colisiones. Los átomos resonantes en el vidrio pueden conservar la energía de la luz durante un tiempo muy largo (alrededor de 100 millonésimas de segundo). Durante este tiempo, el átomo realiza más de 1 millón de vibraciones, choca con átomos vecinos y cede su energía como calor. Por ende, el vidrio no es transparente a la luz ultravioleta.

**VIDEO: Luz y materiales transparentes**

A frecuencias de onda más bajas, como las de la luz visible, los electrones en los átomos del vidrio se fuerzan a ponerse en vibración, pero a amplitudes más bajas. Los átomos conservan la energía durante un tiempo más breve, con menos posibilidad de colisión con los átomos vecinos y con menos energía que se transforme en calor. La energía de los electrones en vibración se vuelve a emitir como luz. El vidrio es transparente a todas las frecuencias de la luz visible. La frecuencia de la luz reemitida que pasa de átomo a átomo es idéntica a la frecuencia de la luz que produjo la vibración en un principio. Sin embargo, existe una leve demora temporal entre la absorción y la reemisión. Es esta

Materiales diferentes tienen estructuras moleculares distintas y, por tanto, absorben o reflejan luz de varios rangos espectrales de modos diferentes.

[4]Por supuesto que los electrones no están en realidad conectados con resortes. Su "vibración" es, propiamente, orbital, ya que se mueven alrededor del núcleo, pero el "modelo de resortes" permite entender la interacción de la luz con la materia. Los físicos diseñaron modelos conceptuales como éste para comprender la naturaleza, en particular a nivel submicroscópico. El valor de un modelo no radica en que sea "verdadero", sino en que sea útil. Un buen modelo no sólo es congruente con las observaciones y las explica, sino también predice lo que puede ocurrir. Si las predicciones del modelo son contrarias a lo que ocurre, entonces el modelo por lo general se perfecciona o se abandona. El modelo simplificado que se presenta aquí (el de un átomo cuyos electrones vibran como si estuvieran en resortes, con un intervalo de tiempo entre la absorción de energía y la reemisión de energía) es muy útil para entender cómo la luz pasa a través de los sólidos transparentes.

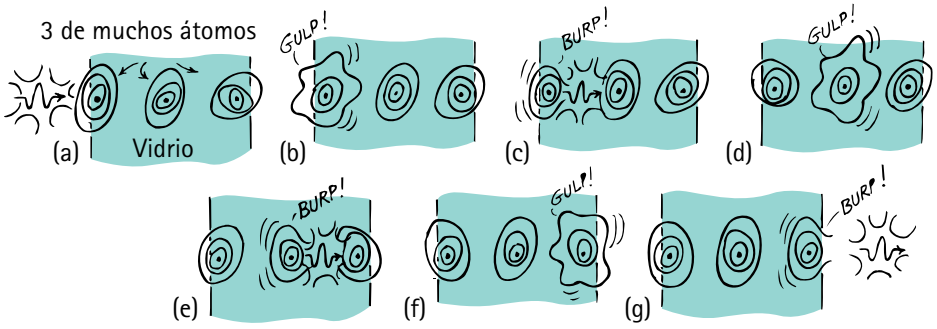



**FIGURA 26.8**
Una onda de luz visible incidente sobre un panel de vidrio pone a vibrar a los átomos de vidrio, lo que produce una cadena de absorciones y reemisiones, por lo cual la energía luminosa atraviesa el material y sale del otro lado. Debido a la demora temporal entre absorciones y reemisiones, la luz viaja con más lentitud a través del vidrio que a través del espacio vacío.

**FIGURA 26.9**
Cuando la bola elevada se suelta y golpea a las otras, la bola que sale en el lado contrario no es la bola que inicia la transferencia de energía. Del mismo modo, la luz que sale de un panel de vidrio no es la misma luz que incidió sobre el vidrio.

demora temporal la que ocasiona una rapidez promedio más baja de la luz cuando atraviesa un material transparente (Figura 26.8).

La luz viaja con diferentes rapideces promedio a través de distintos materiales. Se dice *rapideces promedio* porque la rapidez de la luz en el vacío, ya sea espacio interestelar o el espacio entre las moléculas de un pedazo de vidrio, es una constante de 300,000 km/s. A esto se le llama rapidez de la luz *c*.[5] La rapidez de la luz en la atmósfera es un poco menor que en el vacío, pero por lo general se redondea a *c*. En el agua, la luz viaja a 75% de su rapidez en el vacío, o 0.75*c*. En el vidrio, la luz viaja a unos 0.67*c*, según el tipo de vidrio. En un diamante, la luz viaja a menos de la mitad de su rapidez en el vacío, sólo 0.41*c*. Cuando la luz sale de estos materiales hacia el aire, viaja con su rapidez original *c*.

En el vidrio, las ondas infrarrojas, con frecuencias más bajas que las de la luz visible, no sólo hacen que vibren los electrones, sino que hacen vibrar átomos o moléculas enteras. Esta vibración aumenta la energía interna y la temperatura de la estructura, por lo cual a las ondas infrarrojas con frecuencia se les denomina *ondas de calor*. Por tanto, se observa que el vidrio es transparente a la luz visible, mas no a las luces ultravioleta o infrarroja.

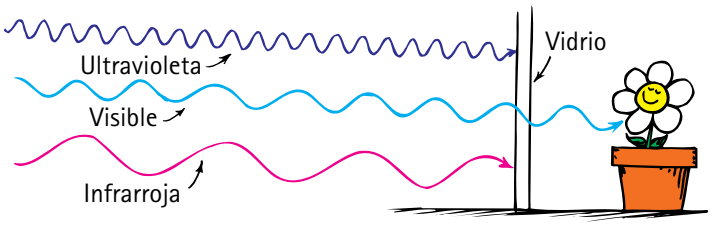



**FIGURA 26.10**
El vidrio bloquea tanto la luz infrarroja como la ultravioleta, pero es transparente a la luz visible.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Por qué el vidrio es transparente a la luz visible, pero opaco a la luz ultravioleta e infrarroja?**
2. **Supón que, mientras caminas por una sala de conferencias, haces varios altos momentáneos en el camino para saludar a las personas que están "en tu longitud de onda". ¿En qué se parece esto a la luz que viaja a través del vidrio?**
3. **¿En qué no se parece?**

[5]El valor aceptado en la actualidad es 299,792 km/s, redondeado a 300,000 km/s. (Esto corresponde a 186,000 mi/s.)

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Dado que la frecuencia natural de vibración de los electrones en el vidrio es la misma que la frecuencia de la luz ultravioleta, hay resonancia cuando las ondas ultravioleta inciden sobre el vidrio. La energía absorbida pasa hacia otros átomos en forma de calor, no se reemite como luz, lo que hace al vidrio opaco a las frecuencias del ultravioleta. En el intervalo de la luz visible, las vibraciones forzadas de los electrones en el vidrio son a amplitudes menores: las vibraciones son más sutiles, hay reemisión de luz (en lugar de generación de calor) y el vidrio es transparente. La luz infrarroja de frecuencia más baja hace que resuenen las moléculas enteras, en lugar de electrones; de nuevo, se genera calor y el vidrio es opaco a la luz infrarroja.
2. La rapidez promedio con la que caminas por la sala es menor de lo que sería si la sala estuviera vacía porque te demoras cada vez que te detienes. Del mismo modo, la rapidez de la luz en el vidrio es menor que en el aire por las demoras que causan las interacciones de la luz con los átomos a lo largo de su trayectoria.
3. Cuando caminas por la sala, eres tú quien comienza y concluye el recorrido. Esto no se parece a la luz que viaja a través del vidrio porque, de acuerdo con el modelo de la luz que pasa a través de un material transparente, la luz absorbida por el primer electrón que se hace vibrar no es la misma luz que se reemite, aun cuando las dos, como gemelas idénticas, sean indistinguibles.

## 26.5 Materiales opacos

Casi todas las cosas que te rodean son **opacas**: absorben luz sin reemitirla. Los libros, los escritorios, las sillas y las personas son opacos. Las vibraciones generadas por la luz a sus átomos y moléculas se convierten en energía cinética aleatoria: en energía interna. Estos materiales se vuelven un poco más calientes.

Los metales son opacos. Debido a que los electrones exteriores de los átomos en los metales no están unidos a un átomo particular, tienen libertad de vagar con muy poca restricción por el material (razón por la cual los metales conducen tan bien la electricidad y el calor). Cuando la luz incide sobre el metal y pone a vibrar estos electrones libres, su energía no "salta" de átomo a átomo en el material, sino que se refleja. Por eso los metales son brillantes.

**FIGURA 26.11**
Los metales son brillantes porque sus electrones libres vibran con facilidad ante las oscilaciones de cualquier luz que cae sobre ellos, y reflejan la mayor parte de ella.

La atmósfera de la Tierra es transparente a cierta luz ultravioleta, a toda la luz visible y a cierta luz infrarroja, pero es opaca a la luz ultravioleta de alta frecuencia. La pequeña cantidad de ultravioleta que pasa a través de ella es la responsable de las quemaduras solares. Si pasara toda, la humanidad se freiría hasta quedar carbonizada. Las nubes son semitransparentes al ultravioleta, así que puedes quemarte en un día nublado. La piel oscura absorbe el ultravioleta antes de que pueda penetrar demasiado, en tanto que éste viaja más profundo en la piel clara. Con una exposición leve y gradual, la piel clara se broncea y aumenta su protección contra la luz ultravioleta. La luz ultravioleta también es perjudicial para los ojos y para los techos alquitranados. Ahora sabes por qué los techos alquitranados están cubiertos con grava.

¿Has notado que las cosas parecen más oscuras cuando están húmedas que cuando están secas? La luz incidente sobre una superficie seca rebota de manera directa a tus ojos, en tanto que la luz incidente sobre una superficie húmeda rebota varias veces en el interior de la región húmeda transparente antes de llegar a tus ojos. ¿Qué ocurre con cada rebote? ¡Absorción! De modo que en una superficie húmeda ocurre más absorción de luz y la superficie parece más oscura.

**pti**

- La radiación ultravioleta de onda larga, llamada UV-A, está cerca de la luz visible y no es la forma dañina de la UV. La ultravioleta con longitud de onda más corta, llamada UV-C, sería dañina si te alcanzara, pero es detenida casi por completo por la capa de ozono de la atmósfera. La ultravioleta intermedia, UV-B, es la que puede causar daño ocular, quemaduras solares y cáncer de piel.

## Sombras

A un delgado haz de luz a menudo se le llama *rayo*. Cuando estás de pie en la luz solar, parte de la luz se detiene y otros rayos continúan en una trayectoria en línea recta. Proyectas una **sombra**, una región donde los rayos de luz no llegan. Si estás cerca de tu propia sombra, el contorno de tu sombra es nítido porque el Sol está alejado. Una fuente luminosa alejada y grande, o una fuente luminosa cercana y pequeña, producirán una sombra nítida. Una fuente luminosa cercana y grande produce una sombra un tanto borrosa (Figura 26.12). Por lo general, en el interior de una sombra hay una

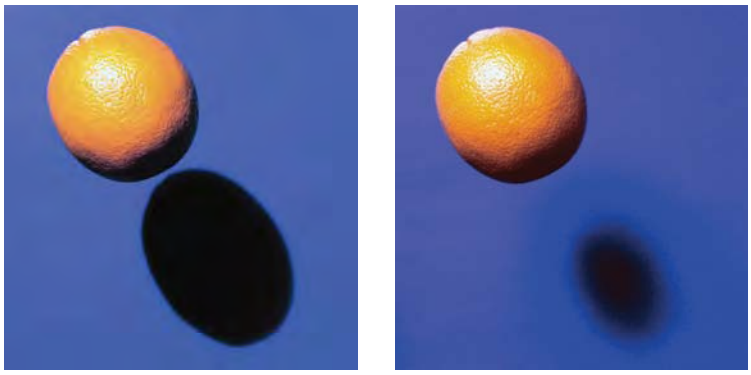


**FIGURA 26.12**
Una fuente de luz pequeña produce una sombra más definida que una fuente más grande.

parte oscura y una parte más clara alrededor de sus bordes. Una sombra total se llama **umbra** y una sombra parcial se llama **penumbra**. La penumbra aparece donde parte de la luz es bloqueada, pero otra luz la llena (Figura 26.13). La penumbra también ocurre cuando la luz proveniente de una fuente ancha sólo es bloqueada en parte.

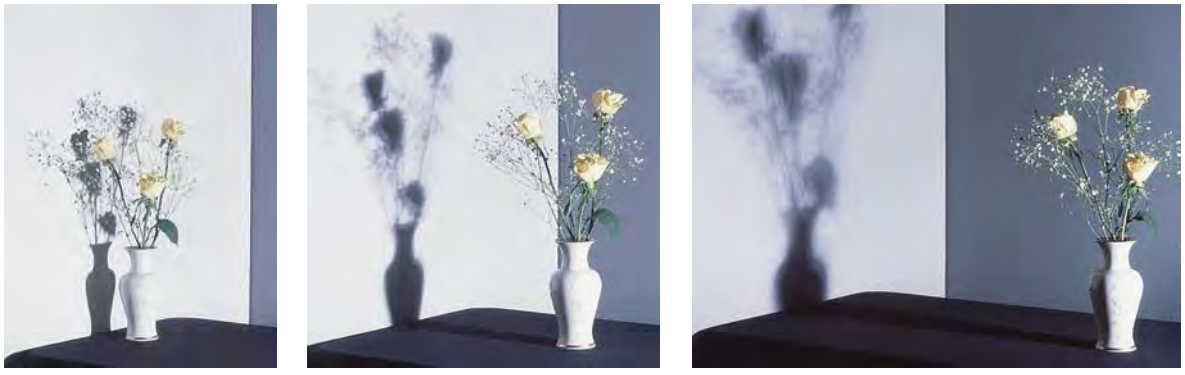


**FIGURA 26.13**
Un objeto que se mantiene cerca de la pared proyecta una sombra nítida porque la luz proveniente de direcciones un poco diferentes no se extiende mucho detrás del objeto. A medida que el objeto se aleja de la pared, la penumbra crece y la umbra se hace más pequeña. Cuando el objeto está todavía más alejado, la sombra es menos definida. Cuando el objeto está muy alejado (no se muestra), no se observa ninguna sombra porque la penumbra se expande y forma un gran manchón.

Tanto la Tierra como la Luna proyectan sombras cuando la luz solar incide sobre ellas. Cuando la trayectoria de cualquiera de estos cuerpos pasa por la sombra proyectada por el otro, ocurre un eclipse (Figura 26.14). Un ejemplo espectacular de la umbra y la penumbra ocurre cuando la sombra de la Luna cae sobre la Tierra durante un **eclipse solar**. Debido al gran tamaño del Sol, los rayos se reducen de manera gradual y proporcionan una umbra y una penumbra circundante (Figura 26.15). Si te paras en la región de umbra de la sombra, experimentas oscuridad durante el día: un eclipse total. Si te paras en la penumbra, experimentas un eclipse parcial y ves un creciente del Sol (recuerda las fotografías de los crecientes de eclipse parcial del Capítulo 1 y recuerda la fotografía al inicio de este capítulo de un eclipse solar visto desde la estación espacial MIR). Durante un **eclipse lunar**, la Luna pasa por la sombra de la Tierra.

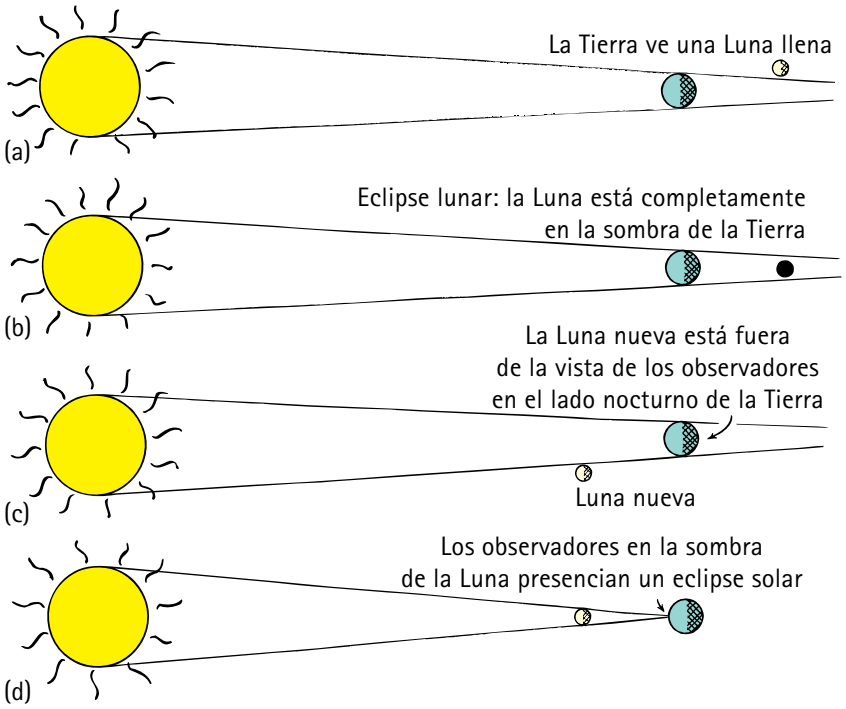



**FIGURA 26.14**
(a) Cuando la Tierra está entre el Sol y la Luna, se ve una Luna llena. (b) Cuando este alineamiento es perfecto, la Luna está en la sombra de la Tierra y se produce un eclipse lunar. (c) Una Luna nueva ocurre cuando la Luna está entre el Sol y la Tierra. (d) Cuando este alineamiento es perfecto, la sombra de la Luna cae sobre parte de la Tierra y se produce un eclipse solar.

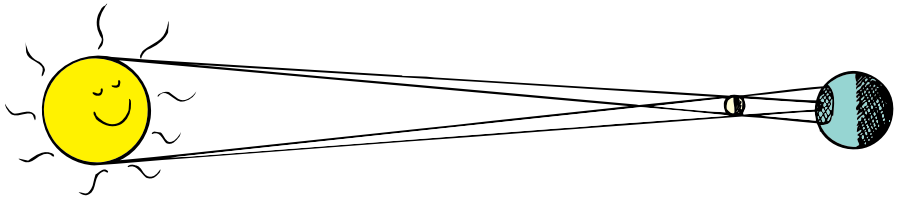


**FIGURA 26.15**
Detalles de un eclipse solar. Los observadores en la umbra ven un eclipse total, y los observadores en la penumbra ven un eclipse parcial. La mayoría de los observadores en la Tierra no ven ningún eclipse.

## PUNTO DE CONTROL

1. **¿Qué tipo de eclipse (solar, lunar o ambos) es peligroso ver sin los ojos protegidos?**
2. **¿Por qué los eclipses lunares son más frecuentes que los eclipses solares?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sólo un eclipse solar es dañino, porque uno ve al Sol de manera directa. Durante un eclipse lunar, uno ve una Luna muy oscura. No es del todo oscura porque la atmósfera de la Tierra actúa como un lente y dobla parte de la luz hacia la región de sombra. Es interesante que ésta sea la luz de los atardeceres y amaneceres rojizos en todo el mundo, por lo que la Luna se ve de un rojo profundo y borroso durante un eclipse lunar.
2. Puesto que la sombra de la Luna, pequeña en relación con el tamaño de la Tierra, cubre una parte muy reducida de la superficie de la Tierra, sólo relativamente pocas personas están en la sombra de la Luna durante un eclipse solar. Pero la sombra de la Tierra que cubre la Luna durante un eclipse lunar está a la vista de todos quienes pueden ver la Luna en el cielo nocturno.

**pti**

- Las personas son advertidas de no ver el Sol durante un eclipse solar porque el brillo y la luz ultravioleta de la luz solar directa dañan los ojos. Este buen consejo con frecuencia es mal entendido por aquellos que piensan que la luz solar es más dañina en este momento especial. Pero mirar al Sol cuando está en lo alto del cielo es dañino con eclipse o sin él. De hecho, ¡mirar al Sol sin protección es más dañino que cuando parte de la Luna lo bloquea! La razón de esta advertencia especial en el momento de un eclipse es tan sólo que más personas están interesadas en mirar al Sol durante este evento.

## 26.6 Viendo la luz: el ojo

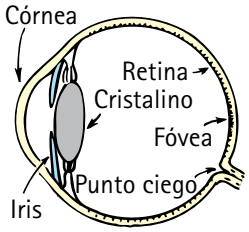



**FIGURA 26.16**
El ojo humano.

La luz es lo único que uno ve con el instrumento óptico más sorprendente que se conoce: el ojo (Figura 26.16). A medida que la luz entra en el ojo, atraviesa la cubierta transparente llamada *córnea*, que realiza cerca de 70% del doblado necesario de la luz antes de que pase por una abertura en el *iris* (parte de color del ojo). La abertura se llama *pupila*. Luego la luz llega al *cristalino*, que afina el enfoque de la luz que pasa a través de un fluido gelatinoso denominado *humor vítreo*. Después la luz pasa a la retina.

La *retina* cubre los dos tercios posteriores del ojo y es responsable del amplio campo de visión que experimentas. Para ver con claridad, la luz debe enfocarse de manera directa sobre la retina. Cuando la luz se enfoca enfrente o detrás de la retina, la visión es borrosa. Hasta hace poco, la retina era más sensible a la luz que cualquier detector artificial jamás inventado. La retina no es uniforme. En medio de ella está la *mácula*, y una pequeña depresión en el centro es la *fóvea*, la región de visión más distintiva. Detrás de la retina está el *nervio óptico*, que transmite señales desde las celdas fotorreceptoras hasta el cerebro.

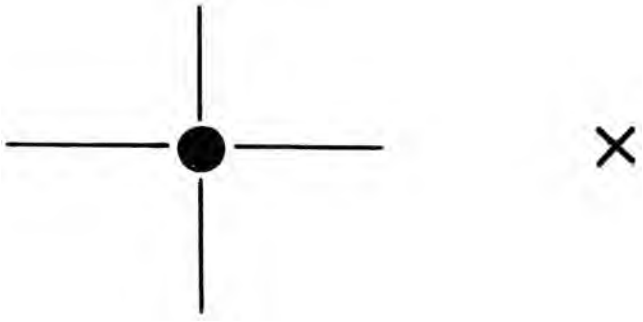


**FIGURA 26.17**
El experimento del punto ciego. Cierra el ojo izquierdo y observa con el ojo derecho el punto redondo. Ajusta tu distancia y encuentra el punto ciego que borra la X. Hazlo con el otro ojo y observa la X y el punto desaparece. ¿Tu cerebro llena las líneas cruzadas en donde estaba el punto?

En la fóvea puede verse con mucho más detalle que en las partes laterales del ojo. También hay un punto en la retina donde los nervios que portan toda la información salen del nervio óptico; es el *punto ciego*. Puedes demostrar que tienes un punto ciego en cada ojo si sostienes este libro a la distancia de tu brazo, cierras el ojo izquierdo y observas la Figura 26.17 sólo con el ojo derecho. A esta distancia puedes ver tanto el punto redondo como la X. Si ahora acercas el libro en forma lenta a tu cara, con el ojo derecho fijo sobre el punto, llegarás a una posición de más o menos 20-25 cm de tu ojo donde la X desaparece. Ahora repite este ejercicio sólo con el ojo izquierdo abierto, esta vez mirando la X, y el punto desaparecerá. Cuando miras con ambos ojos abiertos, no estás al tanto del punto ciego, principalmente porque un ojo "llena" la parte a la que el otro ojo es ciego. Es sorprendente que el cerebro llene lo que se "espera" ver, incluso con un ojo abierto. Repite el ejercicio de la Figura 26.17 con objetos pequeños sobre distintos fondos. Observa que, en lugar de no ver nada, tu cerebro graciosamente llena el fondo adecuado. De modo que no sólo ves lo que está ahí, ¡también ves lo que *no* está ahí!

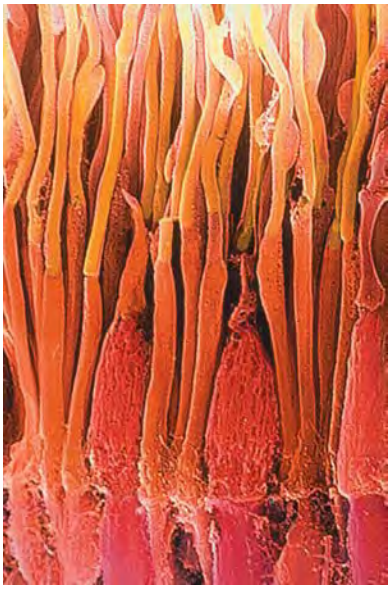


**FIGURA 26.18**
Vista amplificada de los bastones y los conos del ojo humano.

La retina está compuesta de pequeñas antenas que resuenan ante la luz entrante. Hay dos tipos básicos de antenas, los bastones y los conos (Figura 26.18). Como sus nombres lo indican, algunas de las antenas tienen forma de bastón, y otras, forma de cono. Los bastones predominan hacia la periferia de la retina, en tanto que los conos son más densos hacia la fóvea. Los bastones manejan la visión en luz baja, y los conos manejan la visión de color y el detalle. Hay tres tipos de conos: los que son estimulados por luz de frecuencia baja, los que son estimulados por luz de frecuencias intermedias y los que son estimulados por luz de frecuencias más altas. Los conos son muy densos justo en donde está la fóvea, y, dado que están empacados muy juntos, ahí son mucho más finos o estrechos que en ninguna otra parte de la retina. El color se ve con más agudeza si la imagen se enfoca sobre la fóvea, donde no hay bastones. Los primates y una especie de ardilla terrestre son los únicos mamíferos que tienen los tres tipos de conos y experimentan visión a color completa. Las retinas de otros mamíferos consisten en su mayor parte de bastones, que son sensibles sólo al brillo o la oscuridad, como una fotografía o película en blanco y negro.

En el ojo humano, el número de conos disminuye a medida que te alejas de la fóvea. Es interesante que el color de un objeto desaparezca si se ve en la periferia del campo

visual. Para demostrar esto, puedes pedirle a una amiga que entre a tu visión periférica con algunos objetos de colores brillantes. Descubrirás que puedes ver los objetos antes de poder ver de qué color son.

Otra observación interesante es que la periferia de la retina es muy sensible al movimiento. Aunque la visión es mala en el rabillo del ojo, es sensible a cualquier movimiento ahí. Los seres humanos están "programados" para buscar algo que se contonea al lado de su campo visual, una característica que debió de ser importante en su desarrollo evolutivo. Pide a tu amiga que agite estos objetos de colores brillantes cuando los lleve a la periferia de tu visión. Si apenas puedes ver los objetos cuando los agita, pero no los ves en absoluto cuando están inmóviles, entonces no podrás decir de qué color son (Figura 26.19). ¡Inténtalo y observa!

Otra característica distintiva de los bastones y los conos es la intensidad de la luz a la cual reaccionan. Los conos necesitan más energía que los bastones antes de "disparar" un impulso por el sistema nervioso. Si la intensidad de la luz es muy baja, las cosas que ves no tienen color. Las intensidades bajas se ven con los bastones. La visión adaptada a la oscuridad se debe casi por completo a los bastones, en tanto que la visión en la luz brillante se debe a los conos. Las estrellas, por ejemplo, te parecen blancas. Sin embargo, casi todas las estrellas son en realidad de colores brillantes. Una exposición temporal de las estrellas con una cámara revela rojos y anaranjados rojizos para las estrellas "más frías" y azules y violetas azulados para las estrellas "más calientes". Sin embargo, la luz de las estrellas es muy débil para disparar los conos que perciben el color en la retina. Así que las estrellas las ves con los bastones y las percibes blancas o, cuando mucho, sólo con colores débiles. No obstante, las mujeres tienen umbrales un poco más bajos de disparo para los conos y pueden ver un poco más de color que los hombres. Así pues, si ella dice que ve estrellas de colores y él dice que no es cierto, ¡es probable que ella tenga la razón!

Se descubre que los bastones "ven" mejor que los conos hacia el extremo azul del espectro de color, y lo opuesto sucede en el otro extremo del espectro. En lo que respecta a los bastones, un objeto rojo profundo puede parecer negro. Por ende, si tienes dos objetos de color (por decir, uno azul y uno rojo), el azul parecerá mucho más brillante que el rojo en luz difusa, aunque el rojo pueda ser mucho más brillante que el azul en luz brillante. El efecto es muy intrigante. Prueba esto: en una habitación oscura, encuentra una revista o algo que tenga colores y, antes de asegurarte qué colores son, determina las áreas más claras y las más oscuras. Luego lleva la revista a la luz. Debes ver un cambio notable entre los colores más brillantes y más apagados.[6]

Los bastones y los conos de la retina no están conectados de manera directa al nervio óptico sino, muy sorprendentemente, están conectados a muchas otras células que están unidas unas con otras. Si bien muchas de estas células están interconectadas, sólo algunas llevan información al nervio óptico. Por medio de estas interconexiones, una determinada cantidad de información se combina desde varios receptores visuales y "se digiere" en la retina. De esta forma, la señal luminosa "es pensada" antes de ir al nervio óptico y de ahí al cuerpo principal del cerebro. De modo que hay un cierto funcionamiento cerebral en el ojo. El ojo realiza parte del "razonamiento" por ti. Este razonamiento es traicionado por el iris, la parte colorida del ojo que se expande y se contrae y regula el tamaño de la pupila para admitir más o menos luz conforme cambia la intensidad de la luz. Sucede que la expansión o contracción del iris se relaciona con las emociones. Si ves, hueles, saboreas o escuchas algo que te agrada, tus pupilas aumentan de tamaño en forma automática. Si ves, hueles, saboreas o escuchas algo repugnante para ti, tus pupilas se contraen en forma automática. ¡Muchos jugadores de cartas develaron el valor de una mano por el tamaño de sus pupilas! (El estudio del tamaño de la pupila como función de las actitudes se llama *pupilometría*.)

La luz más brillante que el ojo humano puede percibir sin daño es unas 500 millones de veces más brillante que la luz más tenue que puede percibir. Observa una

[6]Este fenómeno se llama *efecto Purkinje*, en honor del fisiólogo checo que lo descubrió.

**pti**

- Algunos de los animales que tienen visión de 360° sin girar la cabeza son los conejos y las liebres debido a sus grandes ojos protuberantes colocados a los lados de la cabeza. Pero sólo tienen percepción de profundidad donde la visión de cada ojo se traslapa un poco enfrente de sus cabezas y detrás de ellos.

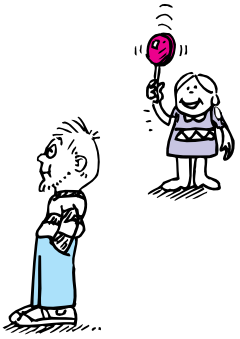


**FIGURA 26.19**
En la periferia de tu visión, puedes ver un objeto sólo si se mueve; no puedes ver su color en lo absoluto.

Los ojos difieren en las diferentes criaturas. En la retina de un pollo hay principalmente conos y sólo algunos bastones, por lo que no ven bien la luz difusa. Las abejas tienen conos que son sensibles a la luz ultravioleta. El calamar gigante tiene los ojos más grandes del mundo.

**FIGURA 26.20**
El tamaño de tus pupilas depende de tu estado de ánimo.

bombilla cercana. Luego voltea para ver una luz más tenue más cercana. La diferencia en intensidad luminosa puede ser de más de un millón a uno. Debido a un efecto llamado *inhibición lateral*, no se perciben las diferencias reales en el brillo. Los lugares más brillantes en el campo visual no eclipsan las demás regiones porque cada vez que una célula receptora en la retina envía al cerebro una señal que corresponde a un brillo muy intenso, también envía señales a las células vecinas para atenuar sus respuestas. De esta forma, se empareja el brillo de tu campo visual, lo que te permite discernir detalles en áreas muy brillantes, y también en áreas oscuras. (Las cámaras no son tan buenas para esto. La fotografía de una escena con fuertes diferencias de intensidad puede estar sobreexpuesta en un área y subexpuesta en otra.) La inhibición lateral exagera la diferencia del brillo en los bordes de los lugares del campo visual. Los bordes, por definición, separan una cosa de otra. De modo que se acentúan las diferencias. El rectángulo gris a la izquierda de la Figura 26.21 parece más oscuro que el rectángulo gris de la derecha cuando el borde que los separa lo tienes a la vista. Pero cubre el borde con tu lápiz o con tu dedo y se verán con el mismo brillo. Eso se debe a que ambos rectángulos *tienen* el mismo brillo; cada rectángulo está sombreado de más claro a más oscuro, si te mueves de izquierda a derecha. El ojo se concentra en la frontera donde el borde oscuro del rectángulo izquierdo se une al borde claro del rectángulo derecho, y el sistema ojo-cerebro supone que el resto del rectángulo es igual. Se pone atención a la frontera y se ignora el resto.

Preguntas que deben considerarse: ¿la forma en la que el ojo selecciona los bordes y hace suposiciones sobre lo que se encuentra más allá es similar a la forma en la que algunas personas emiten juicios sobre otras culturas y otras personas? ¿No tiende uno, de la misma forma, a exagerar las diferencias superficiales al tiempo que ignora las semejanzas y sutiles diferencias internas?

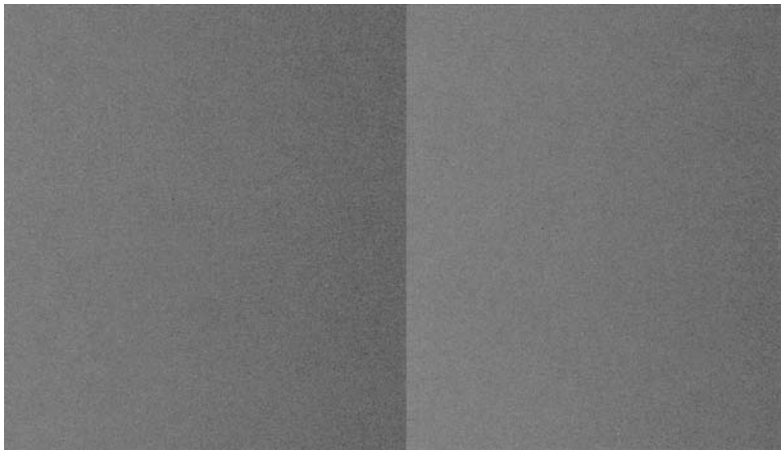


**FIGURA 26.21**
Ambos rectángulos tienen el mismo brillo. Cubre la frontera entre ellos con tu lápiz y observa.

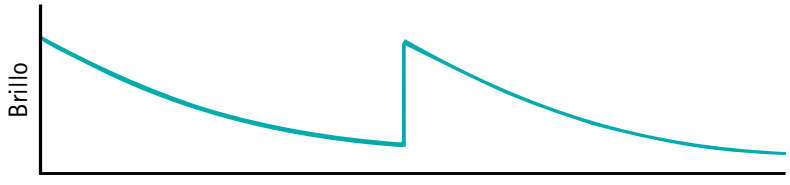
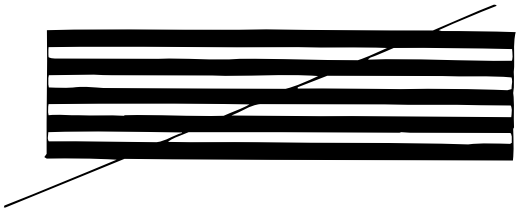
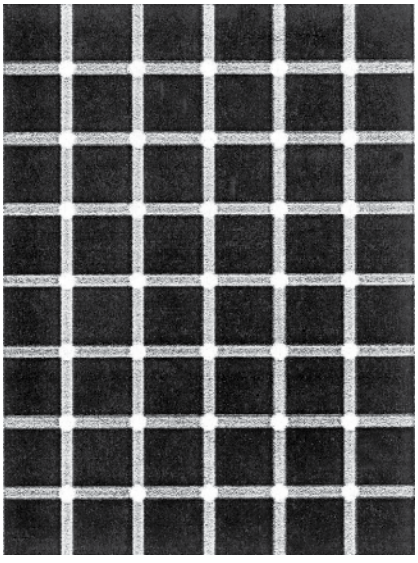



**FIGURA 26.22**
Gráfica de niveles de brillo para el rectángulo de la Figura 26.21.

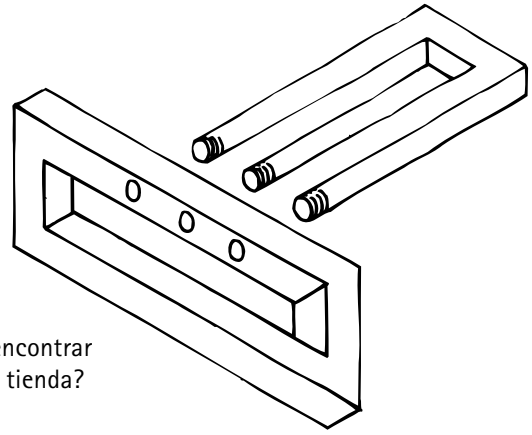


¿La línea inclinada realmente está entrecortada?

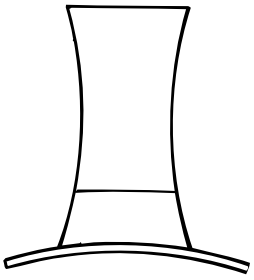
¿Las líneas de la derecha en realidad son más cortas?



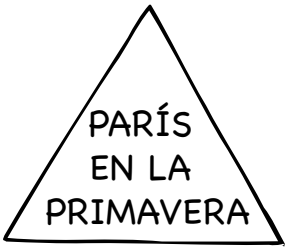
¿Puedes contar los puntos negros?



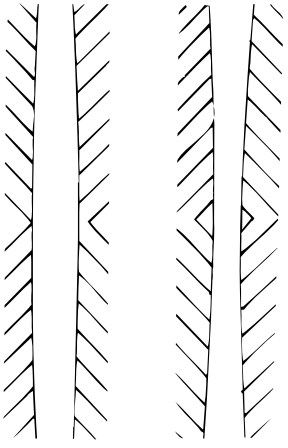
¿Podrías encontrar esto en la tienda?



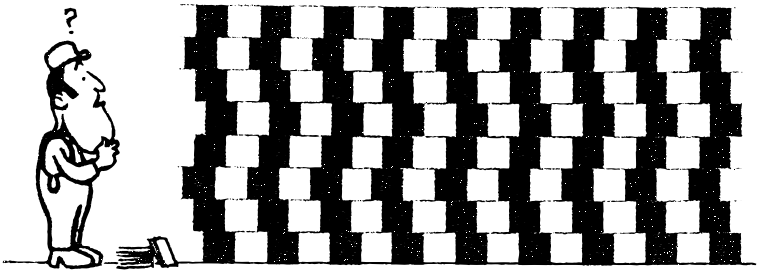
¿La copa es más alta que el ancho del ala?




¿Qué dice esta señal?



¿Las líneas verticales son paralelas?



¿Las filas de ladrillos en realidad están chuecas?

**FIGURA 26.23**
Ilusiones ópticas.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Onda electromagnética.** Onda portadora de energía emitida por una carga en vibración (con frecuencia electrones) que está compuesta de campos eléctrico y magnético oscilatorios que se regeneran mutuamente.

**Espectro electromagnético.** Intervalo de ondas electromagnéticas que se extiende en frecuencia desde las ondas de radio hasta los rayos gamma.

**Transparente.** Propiedad de los materiales para pasar luz en líneas rectas sin dispersarla.

**Opaco.** Propiedad de los materiales que no permite el paso de luz (opuesto a transparente).

**Sombra.** Región oscurecida que aparece donde los rayos de luz son bloqueados por un objeto.

**Umbra.** Parte más oscura de una sombra donde toda la luz es bloqueada.

**Penumbra.** Sombra parcial que aparece donde una parte, mas no toda, de la luz es bloqueada.

**Eclipse solar.** Evento en el cual la Luna bloquea la luz proveniente del Sol y la sombra de la Luna cae sobre parte de la Tierra.

**Eclipse lunar.** Evento en el cual la Luna pasa por la sombra de la Tierra.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 26.1 Ondas electromagnéticas

1. ¿Qué induce un campo magnético variable?
2. ¿Qué induce un campo eléctrico variable?
3. ¿Qué produce una onda electromagnética?

### 26.2 Velocidad de una onda electromagnética

4. ¿De qué manera el hecho de que una onda electromagnética en el espacio nunca frene es congruente con la conservación de la energía?
5. ¿De qué manera el hecho de que una onda electromagnética en el espacio nunca acelere es congruente con la conservación de la energía?
6. ¿Qué contienen y transportan los campos eléctrico y magnético?

### 26.3 El espectro electromagnético

7. ¿Cuál es la principal diferencia entre una onda de radio y la luz? ¿Entre la luz y un rayo X?
8. ¿Más o menos cuánto del espectro electromagnético medido ocupa la luz?
9. ¿Cuál es el color de la luz visible de las frecuencias más bajas? ¿De las frecuencias más altas?
10. ¿Cuál es la diferencia entre la frecuencia de una onda de radio y la frecuencia de los electrones vibratorios que la producen?
11. ¿Cómo se relaciona la longitud de onda de la luz con su frecuencia?
12. ¿Cuál es la longitud de onda de una onda que tiene una frecuencia de 1 Hz y viaja a 300,000 km/s?
13. ¿Qué se entiende cuando se dice que el espacio exterior en realidad no está vacío?

### 26.4 Materiales transparentes

14. El sonido proveniente de un diapasón puede forzar a otro diapasón a vibrar. ¿Cuál es el efecto semejante para la luz?
15. ¿En qué región del espectro electromagnético está la frecuencia resonante de los electrones en el vidrio?
16. ¿Cuál es el destino de la energía de la luz ultravioleta que incide sobre vidrio?
17. ¿Cuál es el destino de la energía de la luz visible que incide sobre vidrio?
18. ¿Cuál es el destino de la energía de la luz infrarroja que incide sobre vidrio?
19. ¿Cómo se compara la frecuencia de la luz reemitida en un material transparente, con la frecuencia de la luz que estimula su reemisión?
20. ¿Cómo se compara la rapidez promedio de la luz en vidrio, con su rapidez en el vacío?
21. ¿Cuál es la diferencia entre la rapidez de la luz que sale de un panel de vidrio y la rapidez de la luz incidente sobre el vidrio?
22. ¿Por qué las ondas infrarrojas con frecuencia se llaman *ondas de calor*?

### 26.5 Materiales opacos

23. ¿Por qué los materiales opacos se vuelven más calientes cuando la luz incide sobre ellos?
24. ¿Por qué los metales son brillantes?
25. ¿Por qué los objetos húmedos suelen parecer más oscuros que cuando están secos?
26. Distingue entre una umbra y una penumbra.
27. ¿La Tierra y la Luna siempre proyectan sombras? Cuando uno pasa por la sombra del otro, ¿cómo se le llama?

### 26.6 Viendo la luz: el ojo

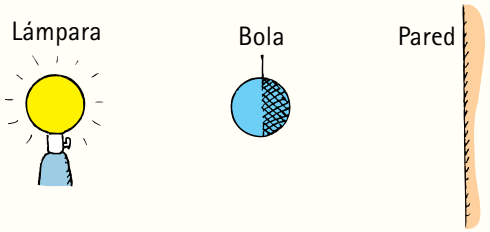
28. ¿Cuál es la diferencia entre los bastones y los conos del ojo?
29. ¿Cuándo son más apreciables los objetos en la periferia de tu visión?
30. Además de la cantidad de luz, ¿qué afecta al tamaño de la pupila del ojo?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

31. Compara el tamaño de la Luna en el horizonte con su tamaño cuando está más alta en el cielo. Una forma de hacer esto es sostener a la distancia de tu brazo varios objetos que apenas bloqueen la Luna. Experimenta hasta que encuentres el objeto exacto, tal vez un lápiz grueso o una pluma. Descubrirás que el objeto será menor de un centímetro, según la longitud de tu brazo. ¿En realidad la Luna es más grande cuando está cerca del horizonte?
32. ¿Cuál ojo usas más? Para demostrar cuál favoreces, sostén un dedo vertical a la distancia de tu brazo. Con ambos ojos abiertos, observa detrás de él objetos distantes. Ahora cierra el ojo derecho. Si tu dedo parece saltar a la derecha, entonces usas más el ojo derecho. Comprueba con tus amigos zurdos y diestros. ¿Existe alguna relación entre el ojo dominante y la mano dominante?

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

33. En 1676, el astrónomo Ole Roemer tuvo uno de esos momentos "ajá" en la ciencia. Concluyó, a partir de múltiples observaciones sobre los eclipses de la luna de Júpiter en diferentes momentos del año, que la luz debe viajar con rapidez finita y necesitaba 1,300 s para atravesar el diámetro de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Usando 300,000,000 km para el diámetro de la órbita terrestre, calcula la rapidez de la luz con base en la estimación de 1,300 s de Roemer. ¿Cómo difiere esto de un valor moderno para la rapidez de la luz?
34. Más de 200 años después, Albert A. Michelson envió un haz de luz desde un espejo giratorio hacia un espejo estacionario a 15 km de distancia. Demuestra que el tiempo transcurrido entre que la luz sale y regresa al espejo giratorio fue de 0.0001 s.
35. El Sol está a $1.50 \times 10^{11}$ m de la Tierra. ¿Cuánto tarda la luz del Sol en llegar a la Tierra? ¿Cuánto tarda la luz en cruzar el diámetro de la órbita de la Tierra? Compara este tiempo con el tiempo medido por Roemer en el siglo XVII (abordado en el problema 33).
36. Demuestra que un pulso de luz láser tardaría 2.5 s en llegar a la Luna y rebotar de vuelta a la Tierra.
37. La estrella más cercana, además del Sol, es Alpha Centauri, a $4.2 \times 10^{16}$ m de distancia. Si hoy se recibiera un mensaje de radio proveniente de esta estrella, demuestra que se habría enviado hace 4.4 años.
38. Una bola con el mismo diámetro que una bombilla se mantiene a la mitad de camino entre la bombilla y una pared, como se muestra en el dibujo. Construye rayos de luz (similares a los de la Figura 26.15) y demuestra que el diámetro de la umbra sobre la pared es el mismo que el diámetro de la bola y que el diámetro de la penumbra es tres veces el diámetro de la bola.




39. Una determinada instalación de radar rastrea aviones mediante la transmisión de radiación electromagnética con una longitud de onda de 3 cm. (a) Demuestra que la frecuencia de esta radiación es 10 GHz. (b) Demuestra que el tiempo necesario para que un pulso de ondas de radar llegue a un avión a 5 km de distancia y regrese es $3.3 \times 10^{-5}$ s.
40. La longitud de onda de la luz cambia a medida que la luz pasa de un medio a otro, en tanto que la frecuencia permanece igual. ¿La longitud de onda es más larga o más corta en agua que en aire? Explica en términos de la ecuación rapidez = frecuencia × longitud de onda. Una determinada luz anaranjada tiene una longitud de onda de 600 nm ($6 \times 10^{-7}$ m) en aire. ¿Cuál es su longitud de onda en agua, donde la luz viaja a 75% de su rapidez en el aire? ¿En plexiglás, donde la luz viaja a 67% de su rapidez en el aire?

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

41. Un amigo dice, con un tono profundo, que la luz es la única cosa que puede ver. ¿Tu amigo está en lo correcto?
42. Tu amigo continúa y ahora dice que la luz es producida por la conexión entre electricidad y magnetismo. ¿Tu amigo está en lo correcto?
43. ¿Cuál es la fuente fundamental de la radiación electromagnética?
44. ¿Cuál tiene longitudes de onda más largas: las ondas de luz, los rayos X o las ondas de radio?
45. ¿Cuál tiene las longitudes de onda más cortas: el ultravioleta o el infrarrojo? ¿Cuál tiene las frecuencias más altas?
46. ¿Cómo es posible tomar fotografías en completa oscuridad?
47. ¿Exactamente qué es lo que oscila en una onda de luz?
48. ¿Cuál es la principal diferencia entre un rayo gamma y un rayo infrarrojo?
49. ¿Cuál es la rapidez de los rayos X en el vacío?
50. ¿Cuál viaja más rápido a través del vacío: un rayo infrarrojo o un rayo gamma?
51. Tu amigo dice que las microondas y la luz ultravioleta tienen diferentes longitudes de onda, pero viajan a través del espacio con la misma rapidez. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?

52. Tu amigo dice que cualquier onda de radio viaja mucho más rápido que cualquier onda sonora. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo, y por qué?
53. Tu amigo dice que el espacio exterior, en vez de estar vacío, está a reventar de ondas electromagnéticas. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?
54. ¿Las longitudes de onda de las señales de radio y televisión son más largas o más cortas que las ondas detectables por el ojo humano?
55. Supón que una onda luminosa y una onda sonora tienen la misma frecuencia. ¿Cuál tiene la longitud de onda más larga?
56. ¿Cuál necesita un medio físico para viajar: la luz, el sonido o ambos? Explica.
57. ¿Las ondas de radio viajan con la rapidez del sonido, con la rapidez de la luz o con alguna rapidez intermedia?
58. ¿Cuáles son las semejanzas y diferencias entre las ondas de radio y la luz?
59. Un láser helio-neón emite luz con longitud de onda de 633 nanómetros (nm). La luz proveniente de un láser de argón tiene una longitud de onda de 515 nm. ¿Cuál láser emite la luz con frecuencia más alta?
60. ¿Por qué esperarías que la rapidez de la luz sea un poco menor en la atmósfera que en el vacío?
61. ¿El vidrio es transparente u opaco a la luz con frecuencias que coinciden con sus frecuencias naturales? Explica.
62. Longitudes de onda corta de luz visible interactúan más a menudo con los átomos en el vidrio que las longitudes de onda más largas. ¿Este tiempo de interacción tiende a acelerar o frenar la rapidez promedio de la luz con longitud de onda corta en el vidrio?
63. ¿Qué determina si un material es transparente u opaco?
64. Puedes sufrir una quemadura solar en un día nublado, pero puedes no quemarte incluso en un día soleado si estás detrás de un vidrio. Explica.
65. Supón que la luz solar cae sobre un par de gafas de lectura y sobre un par de gafas para el Sol. ¿Cuál par de gafas esperarías que se pusiera más caliente? Defiende tu respuesta.
66. ¿Por qué un avión que vuela alto proyecta poca o ninguna sombra sobre el suelo bajo él en tanto que los aviones que vuelan bajo proyectan una sombra nítida?
67. La luz proveniente de una posición sobre la cual concentras tu atención cae sobre tu fóvea, que contiene sólo conos. Si quieres observar una fuente de luz débil, como una estrella tenue, ¿por qué no debes mirar *directamente* a la fuente?
68. ¿Por qué los objetos iluminados por la luz de la Luna carecen de color?
69. ¿Por qué no ves color en la periferia de tu visión?
70. ¿Por qué debes ser escéptico cuando tu pareja te toma de las manos, te mira con las pupilas contraídas y te dice "te amo"?
71. A partir de tu experimentación con la Figura 26.17, ¿tu punto ciego se ubica hacia tu nariz desde tu fóvea o hacia afuera de ella?
72. ¿Puedes inferir que una persona con pupilas grandes por lo general es más feliz que una persona con pupilas pequeñas? Si no es así, ¿por qué no?
73. El planeta Júpiter está más de cinco veces más lejos del Sol que el planeta Tierra. ¿Cómo parece el brillo del Sol a esta mayor distancia?
74. Cuando observas el cielo nocturno, algunas estrellas son más brillantes que otras. ¿Es correcto decir que las estrellas más brillantes emiten más luz? Defiende tu respuesta.
75. Cuando observas una galaxia distante con un telescopio, ¿cómo es que estás viendo hacia atrás en el tiempo?
76. Cuando observas el Sol, lo ves como era hace 8 minutos. Por tanto, sólo puedes ver el Sol "en el pasado". Cuando miras la parte trasera de tu propia mano, ¿la ves "ahora" o "en el pasado"?
77. La "visión 20/20" es una medida arbitraria de la visión, que significa que puedes leer lo que una persona promedio puede leer a una distancia de 20 pies a la luz del día. ¿Cuánto es esta distancia en metros?

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

78. Uno escucha a la gente hablar de la "luz ultravioleta" y la "luz infrarroja". ¿Por qué estos términos son engañosos? ¿Por qué es menos probable que la gente hable de la "luz de radio" y de la "luz de rayos X"?
79. Al saber que el espacio interplanetario consiste en un vacío, ¿cuál es tu evidencia de que las ondas electromagnéticas pueden viajar a través del vacío?
80. ¿Puedes ver las ondas de radio? ¿Puedes escuchar las ondas de radio? Discute esto con las personas que todavía confunden las ondas sonoras con las ondas de radio.
81. Cuando los astrónomos observan una explosión de una supernova en una galaxia distante, ven un súbito aumento simultáneo de la luz visible y de otras formas de radiación electromagnética. ¿Esto es evidencia que sustenta la idea de que la rapidez de la luz es independiente de la frecuencia? Explica.
82. Si disparas una bala a través de una tabla, ésta frenará adentro y saldrá con una rapidez menor a la rapidez con la que entró. Entonces, ¿igualmente la luz frena cuando pasa a través de un vidrio y también sale con una rapidez más baja? Defiende tu respuesta.
83. Imagina que una persona puede caminar sólo con cierto paso, ni más rápido ni más lento. Si cronometras su andar ininterrumpido por una habitación de longitud conocida, puedes calcular su rapidez de marcha. Sin embargo, si la persona se detiene en forma momentánea en su camino para saludar a otras en la habitación, el tiempo adicional que emplea en sus breves interacciones le confiere una rapidez *promedio* cuando camina por la habitación que es menor que su rapidez de marcha. ¿Esto en qué es similar a la luz que pasa a través de un vidrio? ¿En qué forma difiere?

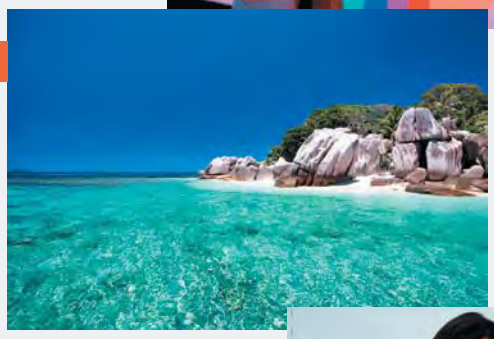
84. Sólo algunas de las personas en el lado diurno de la Tierra pueden presenciar un eclipse solar cuando ocurre, en tanto que todas las personas en el lado nocturno de la Tierra pueden presenciar un eclipse lunar cuando este ocurre. ¿Por qué esto es así?
85. ¿Los planetas proyectan sombras? ¿Cuál es tu evidencia?
86. Los eclipses lunares siempre son eclipses de una Luna llena. Esto es: la Luna siempre se ve llena justo antes y después de que la sombra de la Tierra pasa sobre ella. ¿Por qué? ¿Por qué no puedes tener un eclipse lunar cuando la Luna está en sus fases creciente o de media Luna?
87. En las fotografías al inicio del capítulo, Dean Baird está cubierto primero con imágenes circulares del Sol, luego con imágenes con forma de creciente. ¿Dónde en el cielo está la Luna en relación con el Sol cuando las imágenes son crecientes?
88. Los diámetros de los círculos que constituyen las imágenes solares en la fotografía de Dean son cerca de 1/100 la distancia respecto de las aberturas en las hojas que proyectan las manchas. Esto significa que 100 círculos colocados extremo con extremo se extenderían desde cada mancha hasta la abertura que proyecta la mancha. ¿Cómo te dice esto cuántos soles cabrían entre el árbol y la distancia de 150,000,000 de kilómetros entre el Sol y la Tierra?
89. Paul Doherty, también en las fotografías al inicio del capítulo, muestra imágenes de un eclipse anular. Observa que las imágenes son contornos circulares completos. En este momento especial, ¿la distancia promedio de la Luna a la Tierra está más cerca, más lejos o a su distancia habitual?
90. En 2004, el planeta Venus pasó entre la Tierra y el Sol. ¿Qué tipo de eclipse, si lo hubo, ocurrió?
91. ¿Qué evento astronómico verían observadores en la Luna en el momento en que la Tierra experimentara un eclipse lunar? ¿En el momento en que la Tierra experimentara un eclipse solar?
92. La intensidad de la luz disminuye como el inverso al cuadrado de la distancia respecto de la fuente. ¿Esto significa que se pierde energía luminosa? Explica.
93. La luz proveniente del flash de una cámara disminuye con la distancia, en concordancia con la ley del inverso al cuadrado. Comenta acerca de un pasajero de avión que toma una fotografía con flash de una ciudad en la noche desde un avión que vuela alto.
94. Los barcos determinan la profundidad del océano al rebotar ondas de sonar desde el fondo marino y medir el tiempo de viaje redondo. ¿Cómo es que los aviones determinan de igual forma su distancia hasta el suelo bajo ellos?

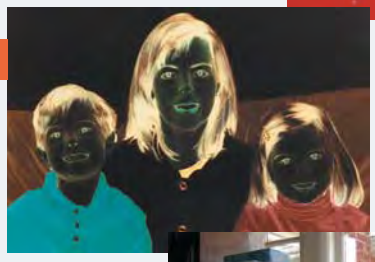
27

CAPÍTULO 27

# Color


27.1 Color en el mundo
27.2 Reflexión selectiva
27.3 Transmisión selectiva
27.4 Mezcla de luces de colores
27.5 Mezcla de pigmentos de colores
27.6 Por qué el cielo es azul
27.7 Por qué los atardeceres son rojos
27.8 Por qué las nubes son blancas
27.9 Por qué el agua es azul verdoso





1 Carlos Vásquez despliega una variedad de colores cuando es iluminado sólo con lámparas roja, verde y azul. 2 El color azul del cielo se debe a la dispersión de la luz solar en el aire; el color cian del agua del océano tropical se debe a la absorción de las porciones infrarroja y roja de la luz solar en el agua. 3 Una fotografía de la escritora científica Suzanne Lyons con sus hijos Tristán y Simone. 4 Un negativo de la misma fotografía muestra sus colores complementarios. 5 El colorista y profesor de física Jeff Wetherhold (Parkland High School en Allentown, PA) tiene dos pasiones: pintar y enseñar física.

Isaac Newton no se hizo famoso primero por sus leyes del movimiento, ni siquiera por su ley de gravitación universal. La fama de Newton comenzó con su estudio de la luz. Aproximadamente en 1665, mientras estudiaba las imágenes de los cuerpos celestes formadas por una lente, observó coloración en los bordes de las imágenes. Para examinar esto, oscureció su habitación y dejó que un haz de luz solar pasara por un pequeño orificio circular de la persiana que produjo una mancha circular de luz blanca sobre la pared opuesta. Luego colocó un prisma triangular de vidrio en el haz de luz y observó que la luz blanca se separaba en los colores del arcoíris.

Newton demostró que dentro de un haz de luz solar están todos los colores del arcoíris. La luz blanca es una composición de los colores del arcoíris. Además, demostró que un arcoíris es el resultado de una dispersión similar de la luz solar por las gotas de agua del cielo.

Más importante, con un segundo prisma, Newton descubrió que estos colores podían recombinarse y volver a formar luz blanca, lo cual confirmaba que la luz blanca era, de hecho, la combinación de todos los colores del arcoíris. A la mitad de su vida fue electo para la Royal Society, donde mostró el primer telescopio reflector del mundo. Éste todavía puede admirarse en la biblioteca de la Royal Society en Londres, donde se conserva con la inscripción: "El primer telescopio reflector, inventado por sir Isaac Newton y fabricado con sus propias manos".

## 27.1 Color en el mundo

Las rosas son rojas y las violetas son azules; los colores intrigan a artistas y físicos por igual. Para el físico, los colores de los objetos no están en las sustancias de los objetos en sí o ni siquiera en la luz que emiten o reflejan. El color es una experiencia fisiológica y está en el ojo de quien lo observa. Así que, cuando se dice que la luz de una rosa es roja, en un sentido más estricto lo que se quiere decir es que *parece* roja. Muchos organismos, incluidas las personas con una visión del color defectuosa, no ven la rosa como roja en absoluto.

Los colores que uno ve dependen de la frecuencia de la luz que uno ve. Luces de diferentes frecuencias se perciben como colores diferentes; la mayoría de las personas percibe la luz con la frecuencia más baja que pueden detectar los seres humanos como color rojo, y la frecuencia más alta, como violeta. Entre ellas se encuentra un número infinito de tonalidades que constituyen el espectro de color del arcoíris. Por convención, dichas tonalidades se agrupan en los siete colores: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo y violeta. Las luces de estos colores juntas se ven como blanca. La luz blanca del Sol es una combinación de todas las frecuencias visibles.

## 27.2 Reflexión selectiva

Excepto por fuentes de luz como las lámparas, los láseres y los tubos de descarga de gas (que se estudiarán en el Capítulo 30), la mayor parte de los objetos que te rodean refleja la luz, más que emitirla. Sólo reflejan una parte de la luz que incide sobre ellos, la parte que les da su color. Una rosa, por ejemplo, no emite luz; refleja la luz (Figura 27.1). Si se hace pasar la luz solar por un prisma y luego se coloca una rosa color rojo oscuro en varias partes del espectro, los pétalos parecen marrón o negro en todas las partes del espectro excepto en el rojo. En la parte roja del espectro, los pétalos se ven rojos, pero el tallo verde y las hojas se ven negras. Esto demuestra que los pétalos rojos tienen la capacidad de reflejar la luz roja, pero no la luz de otros colores. Del mismo modo, las hojas verdes tienen la capacidad de reflejar la luz verde, pero no la luz de otros colores. Cuando la rosa se coloca en la luz blanca, los pétalos parecen rojos y las hojas parecen verdes porque los pétalos reflejan la parte roja de la luz blanca y las hojas reflejan la parte verde. Para entender por qué los objetos reflejan colores de luz específicos, debes dirigir tu atención al átomo.

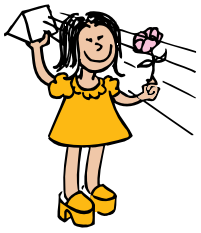


**FIGURA 27.1**
Los colores de las cosas dependen de los colores de la luz que los ilumina.

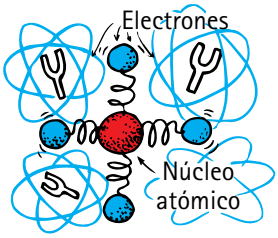



**FIGURA 27.2**
Los electrones exteriores de un átomo vibran y resuenan tal como lo harían pesas sobre resortes. Por consiguiente, los átomos y las moléculas se comportan, en cierto modo, como diapasones ópticos.

La manera en que la luz se refleja en los objetos es similar a la forma en la que el sonido se "refleja" en un diapasón cuando otro diapasón cercano lo pone a vibrar. Un diapasón puede hacer que otro vibre aun cuando las frecuencias no coincidan, si bien con amplitudes reducidas en forma significativa. Lo mismo sucede con los átomos y las moléculas. Los campos eléctricos oscilatorios de las ondas electromagnéticas pueden forzar la vibración de los electrones exteriores que zumban alrededor del núcleo atómico.[1] Una vez en vibración, estos electrones envían sus propias ondas electromagnéticas, tal como los diapasones acústicos vibratorios envían ondas sonoras.

Cada material tiene frecuencias naturales diferentes para absorber y emitir radiación electromagnética. En un material, los electrones oscilan con facilidad a ciertas frecuencias; en otro material, oscilan con facilidad a frecuencias diferentes. A frecuencias resonantes en las cuales las amplitudes de oscilación son grandes, la luz es absorbida, pero a frecuencias por debajo y por arriba de las frecuencias resonantes, la luz se reemite. Si el material es transparente, la luz reemitida pasa a través de él. Si el material es opaco, la luz reemitida regresa al medio del cual provino. Esto es reflexión.

Por lo general, un material absorbe luz de algunas frecuencias y refleja el resto. Si un material absorbe la mayor parte de la luz visible que incide sobre él, pero refleja el rojo, por ejemplo, entonces parece rojo. Es por ello que los pétalos de una rosa roja son rojos y el tallo es verde. Los átomos de los pétalos absorben toda la luz visible excepto la roja, la cual reflejan; los átomos del tallo absorben toda la luz excepto la verde, la cual reflejan. Un objeto que refleja la luz de todas las frecuencias visibles, como lo hace la parte blanca de esta página, es del mismo color que la luz que alumbra sobre él. Si un material absorbe toda la luz que alumbra sobre él, no refleja nada y se ve negro.

**FIGURA 27.3**
(a) Una bola roja vista bajo luz blanca. El color rojo se debe a que la bola refleja sólo la pare roja de la luz que lo ilumina. El resto de la luz es absorbido por la superficie. (b) Una bola roja vista bajo luz roja. (c) Una bola roja vista bajo luz verde. La bola parece negra porque la superficie absorbe la luz verde: no hay fuente de luz roja para que la refleje.

(a) (b) (c)

**FIGURA 27.4**
La mayor parte del pelaje del conejo refleja luz de todas las frecuencias y parece blanco a la luz solar. Su pelaje oscuro absorbe toda la energía radiante de la luz solar incidente y, por tanto, parece negro.

Es interesante que los pétalos de casi todas las flores amarillas, como los narcisos, reflejen el rojo y el verde, así como el amarillo. Los narcisos amarillos reflejan una amplia banda de frecuencias. Los colores reflejados de la mayoría de los objetos no son colores puros de una sola frecuencia, sino que están compuestos de una variedad de frecuencias.

Un objeto puede reflejar sólo aquellas frecuencias que están presentes en la luz que ilumina. Por lo tanto, el aspecto de un objeto coloreado depende del tipo de luz que lo ilumine. Una lámpara incandescente, por ejemplo, emite más luz en las frecuencias bajas que en las altas, lo que intensifica cualquier rojo que se vea en esta luz. En una tela que sólo tenga una pequeña cantidad de rojo, el rojo es más evidente bajo una lámpara incandescente de lo que es bajo una lámpara fluorescente. Las lámparas fluorescentes son más ricas en las frecuencias más altas y, por tanto, los azules se intensifican bajo ellas. Por lo general, el color "verdadero" de un objeto corresponde al color que tiene en la luz diurna. Cuando compres ropa o accesorios, el color que ves en la luz artificial puede ser muy diferente del color verdadero (Figura 27.5).

[1]Las palabras *oscilación* y *vibración* se refieren ambas al movimiento periódico: un movimiento que se repite de manera regular.

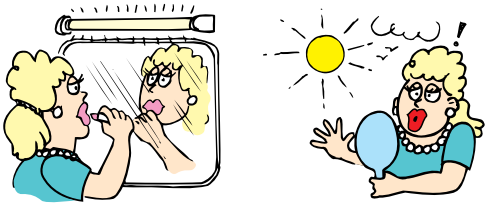


**FIGURA 27.5**
El color depende de la fuente de luz.

## 27.3 Transmisión selectiva

El color de un objeto transparente depende del color de la luz que transmite. Un pedazo de vidrio de color contiene tintes o *pigmentos*: pequeñas partículas que selectivamente absorben luz de ciertas frecuencias y transmiten otras de manera selectiva. Un pedazo de vidrio rojo se ve rojo porque absorbe todos los colores que constituyen la luz blanca, con excepción de la roja, que es la que *transmite*. De igual modo, un pedazo de vidrio azul parece azul porque absorbe luz de los demás colores que lo iluminan y transmite principalmente luz azul. En términos atómicos, los electrones de los átomos del pigmento absorben de manera selectiva la luz de ciertas frecuencias. La luz de otras frecuencias se reemite de molécula a molécula en el vidrio. La energía de la luz absorbida aumenta la energía cinética de las moléculas y el vidrio se calienta. Las ventanas de vidrio ordinarias no tienen color porque transmiten la luz de todas las frecuencias visibles con la misma efectividad.

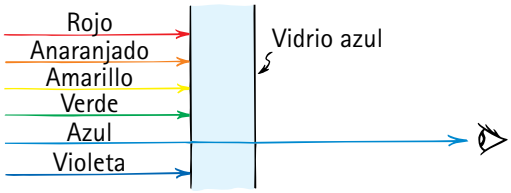



**FIGURA 27.6**
Sólo se transmite la energía que tiene la frecuencia de la luz azul; la energía de las demás frecuencias o se absorbe para calentar el objeto, o se refleja.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Cuando es luz roja la que alumbra una rosa roja, ¿por qué las hojas se ponen más calientes que los pétalos?**
2. **Cuando es luz verde la que alumbra una rosa, ¿por qué los pétalos parecen negros?**
3. **Si sostienes cualquier fuente de luz blanca entre tú y un pedazo de vidrio rojo, verás dos reflejos del vidrio: uno desde la superficie frontal y uno desde la superficie trasera. ¿De qué color es cada reflejo?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Las hojas absorben la energía de la luz roja, en lugar de reflejarla y, por tanto, se ponen más calientes.
2. Los pétalos absorben la luz verde, en lugar de reflejarla. Puesto que el verde es el único color que ilumina la rosa y dado que el verde no contiene rojo para reflejarse, la rosa no refleja color y parece negra.
3. La reflexión desde la superficie frontal es blanca porque la luz no entra lo suficiente en el vidrio de color para permitir la absorción de luz que no sea roja. Sólo la luz roja llega a la superficie trasera, porque los pigmentos del vidrio absorben todos los demás colores y, por tanto, la reflexión trasera es roja.

## 27.4 Mezcla de luces de colores

Es muy fácil demostrar que la luz blanca proveniente del Sol es una composición de todas las frecuencias visibles, como lo hizo Newton por primera vez hace casi cuatro siglos, cuando hizo pasar luz solar por un prisma para formar un espectro con los colores del arcoíris y luego, utilizando un segundo prisma, recombinó dicho espectro en luz blanca. La intensidad de la luz proveniente del Sol varía con la frecuencia, y es más intensa en la parte amarillo-verde del espectro. Es interesante observar que los ojos humanos evolucionaron para tener una máxima sensibilidad en este intervalo. Es por ello que cada vez más camiones de bomberos en la actualidad se pintan de

Es interesante observar que el "negro" que ves en las escenas más oscuras en una pantalla de televisión es tan sólo el color de la pantalla sin iluminar, que es más un color gris claro que negro. Puesto que tus ojos son sensibles al contraste con las partes iluminadas de la pantalla, ves este color gris como negro.

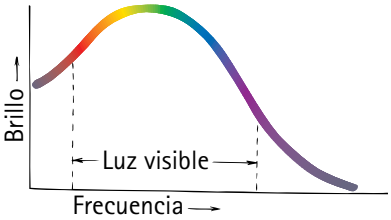



**FIGURA 27.7**
La curva de radiación de la luz solar es una gráfica de brillo y frecuencia. La luz solar es más brillante en la región amarillo-verde, en medio del intervalo visible.

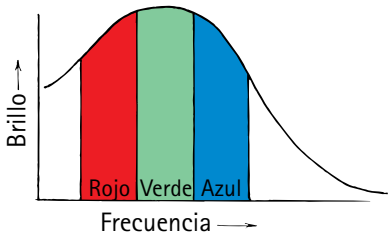



**FIGURA 27.8**
Curva de radiación de la luz solar dividida en tres regiones: roja, verde y azul (RGB, por sus siglas en inglés). Éstos son los colores primarios aditivos.

**SCREENCAST: Color**

amarillo-verde, en particular en los aeropuertos, donde la visibilidad es vital. La sensibilidad a la luz amarillo-verde también explica por qué ves mejor de noche con la iluminación de las lámparas de vapor de sodio amarillas que con las lámparas que tienen filamento de tungsteno del mismo brillo.

La distribución gráfica de brillo y frecuencia se denomina *curva de radiación* de luz solar (Figura 27.7). Casi todos los blancos producidos con luz solar reflejada comparten esta distribución de frecuencia.

Todos los colores combinados forman blanco. Es interesante que la percepción del blanco también sea resultado de la combinación de sólo la luz roja, verde y azul. Para entender esto, se divide la curva de radiación solar en tres regiones, como en la Figura 27.8. Tres tipos de receptores con forma de cono en tus ojos perciben el color. La luz en el tercio inferior de la distribución espectral estimula los conos sensibles a frecuencias bajas y parece roja; la luz en el tercio de en medio estimula los conos sensibles a frecuencias medias y parece verde; la luz en el tercio superior estimula los conos sensibles a las frecuencias más altas y parece azul. Cuando los tres tipos de conos se estimulan de manera equitativa, se ve blanco.

## Colores primarios

Si proyectas luz roja, verde y azul con el mismo brillo sobre una pantalla, verás que, donde todas se traslapan, se produce blanco. Donde dos de los tres colores se traslapan, se produce otro color (Figura 27.9). En el lenguaje de los físicos, se dice que las luces de colores que se traslapan se *suman* unas con otras. Entonces, se dice que las luces roja, verde y azul *se suman para producir luz blanca*, y que cualesquiera dos de estos colores de luz se suman para producir otro color. Diferentes cantidades de rojo, verde y azul, que son los colores a los cuales son sensibles cada uno de los tres tipos de conos, producen cualquier color en el espectro. Por esta razón, el rojo, el verde y el azul se llaman **colores primarios aditivos**. Este sistema de color, conocido por las iniciales RGB, se usa en monitores de computadora y en aparatos de televisión. Puntos rojos, verdes y azules crean la imagen. El cian, el amarillo y el magenta aparecen donde se traslapan pares de puntos. Un examen cercano de la imagen en una pantalla de televisión revelará el ensamblaje de manchas diminutas, cada una de menos de un milímetro de diámetro. Cuando la pantalla se enciende, las mezclas de colores RGB vistos a distancia proporcionan un rango completo de colores, incluido el blanco.

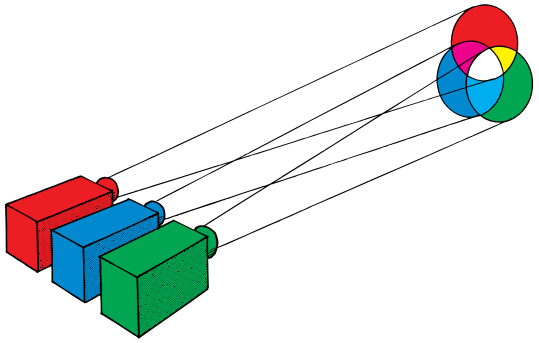


**FIGURA 27.9**
Adición de color por la mezcla de luces de colores. Cuando tres proyectores alumbran con luces roja, verde y azul sobre una pantalla blanca, las partes que se traslapan producen colores diferentes. El blanco se produce donde los tres colores se traslapan.

Si se suman combinaciones diferentes de colores puros del arcoíris con intensidades diferentes y se contrastan con entornos más brillantes o más tenues, se pueden producir colores como rosa chillón, marrón y cualquier otro de los colores de la naturaleza.

**PUNTO DE CONTROL**

**Ya que la luz blanca es la suma de todos los colores, ¿el negro es simplemente la ausencia de luz?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Sí.

## Colores complementarios

He aquí lo que sucede cuando se combinan dos de los tres colores primarios aditivos con la misma intensidad:

Rojo + azul = magenta
Rojo + verde = amarillo
Azul + verde = cian

Se dice que el magenta es el opuesto del verde, el amarillo es el opuesto del azul y el cian es el opuesto del rojo. Ahora, cuando se suma cada uno de estos colores con su opuesto, se obtiene blanco:

Magenta + verde = blanco (= rojo + azul + verde)
Amarillo + azul = blanco (= rojo + verde + azul)
Cian + rojo = blanco (= azul + verde + rojo)

Cuando dos colores se suman y producen blanco, se llaman **colores complementarios**. Cada tonalidad tiene algún color complementario que, cuando se suma con él, resulta en blanco.

El hecho de que un color y su complemento se combinen para producir luz blanca se aprovecha muy bien en la iluminación de las artes escénicas. Las luces azul y amarilla que alumbran a los intérpretes, por ejemplo, producen el efecto de luz blanca, excepto donde uno de los dos colores está ausente, como en las sombras. La sombra de una lámpara —por decir, la azul— es iluminada por la lámpara amarilla y parece amarilla. De igual modo, la sombra proyectada por la lámpara amarilla se ve azul. Éste es un efecto muy interesante. Este efecto se observa en la Figura 27.10, donde las luces roja, verde y azul alumbran la pelota de golf. Observa las sombras proyectadas por la pelota. La sombra del medio la proyecta el proyector verde y no es oscura porque está iluminada por las luces roja y azul, lo que forma magenta. La sombra proyectada por la luz azul parece amarilla porque está iluminada por las luces roja y verde. ¿Puedes ver por qué la sombra proyectada por la luz roja parece cian?

**VIDEO: El pico amarillo-verde de la luz solar**

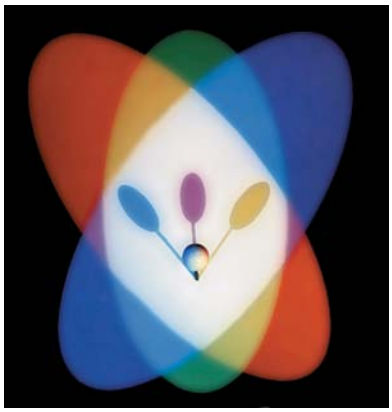


**FIGURA 27.10**
La pelota de golf blanca parece blanca cuando se ilumina con luces roja, verde y azul de iguales intensidades. ¿Por qué las sombras de la pelota son de color cian, magenta y amarillo?

**PUNTO DE CONTROL**

1. **A partir de la Figura 27.9, encuentra los complementos del cian, el amarillo y el rojo.**
2. **Rojo + azul = _____**
3. **Blanco − rojo = _____**
4. **Blanco − azul = _____**

**VIDEO: Sombras de colores**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Rojo, azul, cian
2. Magenta
3. Cian
4. Amarillo

## 27.5 Mezcla de pigmentos de colores

Todo artista sabe que si mezclas pintura roja, verde y azul, el resultado no será blanco, sino un fangoso marrón oscuro. Por supuesto, las pinturas roja y verde no se combinan para formar amarillo, como es la regla para la mezcla de luces de colores. La mezcla de pigmentos en pinturas y tintes difiere por completo de la mezcla de luces. Los pigmentos son pequeñas partículas que absorben colores específicos. Por ejemplo, los pigmentos que producen el color rojo absorben el color complementario cian. De modo que algo

pintado de rojo absorbe principalmente cian, por lo que refleja el rojo. En efecto, el cian se *resta* de la luz blanca. Algo pintado de azul absorbe el amarillo y, por tanto, refleja todos los colores excepto el amarillo. Quita el amarillo del blanco y obtienes azul. El cian, el amarillo y el magenta son los **colores primarios sustractivos**. La variedad de colores en las fotografías a color de cualquier libro es el resultado de puntos color cian, amarillo y magenta. La luz ilumina el libro, y la luz de ciertas frecuencias se resta de la luz reflejada. Las reglas de la sustracción del color difieren de las reglas de la suma de luz.

La impresión a color es una aplicación interesante de la mezcla de colores. Se toman tres fotografías (separación de color) de la ilustración que se va a imprimir: una a través de un filtro magenta, una a través de un filtro amarillo y una a través de un filtro cian. Cada uno de los tres negativos tiene un patrón diferente de áreas expuestas que corresponde al filtro utilizado y a la distribución de color de la ilustración original. La luz alumbra a través de estos negativos sobre placas metálicas que tienen un tratamiento

**FIGURA 27.11**
Sólo cuatro colores de tinta se utilizan para imprimir ilustraciones y fotografías a color: (a) magenta, (b) amarillo, (c) cian, negro. Cuando se combinan el magenta, el amarillo y el cian, producen (d). La adición de negro (e) produce el resultado final (f).

**FIGURA 27.12**
Los tintes o pigmentos, como en las tres transparencias mostradas, absorben y restan de manera efectiva luz de algunas frecuencias y sólo transmiten parte del espectro. Los colores primarios sustractivos son cian, amarillo y magenta. Cuando la luz blanca atraviesa las hojas encimadas de estos colores, se bloquea (resta) la luz de todas las frecuencias y se tiene negro. Donde sólo se traslapan cian y amarillo, se resta luz de todas las frecuencias, excepto verde. Varias proporciones de tintes cian, amarillo y magenta producirán casi cualquier color del espectro.

especial para contener tinta de impresión sólo en áreas que se han expuesto a la luz. Los depósitos de tinta son regulados sobre diferentes partes de la placa por puntos diminutos. Las impresoras de inyección de tinta depositan varias combinaciones de tintas cian, amarillo, magenta y negro. Esto es impresión CMYK (iniciales en inglés de cian, magenta y amarillo; K indica negro). Es interesante que los tres colores puedan producir negro, pero eso ocupa más tinta y deja un tono de color, de ahí la tinta negra, que funciona mejor. Examina con una lupa el color de cualquiera de las figuras de un libro y verás cómo los puntos de estos colores que se enciman muestran un amplio rango de colores. U observa de cerca un tablero de anuncios.

Se observa que todas las reglas de suma y resta de colores pueden deducirse de las Figuras 27.9, 27.10 y 27.12.

Cuando observas los colores de una pompa de jabón o película jabonosa, ves cian, amarillo y magenta de forma predominante. ¿Qué te dice esto? ¡Te dice que algunos colores primarios se sustrajeron de la luz blanca original! (En el Capítulo 29 se estudiará cómo ocurre esto.)

**FIGURA 27.13**
Los vivos colores de Sneezlee representan muchas frecuencias de luz. Sin embargo, la fotografía es una mezcla de sólo cian, amarillo, magenta y negro (CYMK).

**PUNTO DE CONTROL**

**Para la proyección de luz, los colores primarios son RGB. Para la luz que se ve por reflexión de superficies opacas, los colores primarios son CMY. ¿Esto es correcto?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

¡Sí! Y para la luz reflejada, mezcla el negro con los colorantes para obtener imágenes primorosas.

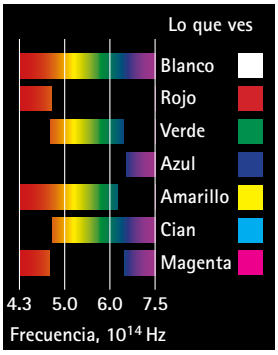



**FIGURA 27.14**
Rangos aproximados de las frecuencias que se perciben como los colores primarios aditivos y los colores primarios sustractivos.

## 27.6 Por qué el cielo es azul

No todos los colores son resultado de la suma o resta de luz. Algunos colores, como el azul del cielo, son resultado de la *dispersión*. Para entender la dispersión, piensa en un haz de sonido de una frecuencia particular dirigido a un diapasón. El diapasón se pone a vibrar y redirige el haz en múltiples direcciones. El diapasón *dispersa* el sonido. Si la frecuencia de la onda sonora incidente está cerca de la frecuencia de vibración natural del diapasón, la dispersión es intensa. Si la frecuencia del haz está lejos de la frecuencia natural del diapasón, la dispersión es débil.

Un proceso similar se observa con la dispersión de la luz por parte de átomos y moléculas en la atmósfera.[2] Estas partículas emiten luz con más intensidad en la región ultravioleta, por lo que se puede decir que tienen frecuencias naturales que son más altas que las frecuencias de la luz visible. Esto significa que la frecuencia de la luz azul se parecerá más que la luz roja a las frecuencias naturales de los átomos y las moléculas y se dispersará con más intensidad que la luz roja. Puedes pensar que una molécula en el aire es como una pequeña campana que "tañe" a una frecuencia alta, como la de la Figura 27.2, pero puede activarse para vibrar débilmente a una frecuencia más baja. Las moléculas de nitrógeno y oxígeno que constituyen la mayor parte de la atmósfera son como pequeñas campanas que "tañen" con frecuencias altas cuando las energiza la luz solar. Al igual que el sonido de las campanas o de los diapasones, la luz reemitida se envía en todas direcciones.

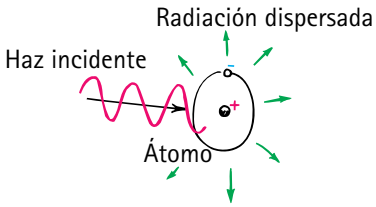



**FIGURA 27.15**
Un haz de luz cae sobre un átomo y aumenta el movimiento vibratorio de los electrones en el átomo. Los electrones vibratorios reemiten la luz en varias direcciones. La luz se dispersa.

**SCREENCAST: Por qué el cielo es azul**

[2]Este tipo de dispersión, llamada *dispersión Rayleigh*, ocurre siempre que las partículas dispersadas son mucho más pequeñas que la longitud de onda de la luz incidente y tienen resonancias a frecuencias más altas que las de la luz dispersada. La dispersión es más compleja de lo que se expone en este texto.

**FIGURA 27.16**
Cuando el aire está limpio, la dispersión de luz de alta frecuencia ofrece un cielo azul. Cuando el aire está lleno de partículas más grandes que las moléculas, también se dispersa la luz de frecuencia más baja, la que se suma al azul para producir un cielo blancuzco.

**FIGURA 27.17**
En las plumas de un arrendajo azul no hay pigmentos azules. Más bien, hay pequeñas células alveolares en las barbas de sus plumas que dispersan la luz, principalmente luz de alta frecuencia. De modo que un arrendajo azul es azul por la misma razón que el cielo es azul: dispersión.

**VIDEO: Por qué el cielo es azul y por qué el atardecer es rojo**

¿Verdad que saber por qué el cielo es azul y por qué los atardeceres son rojos se *suma* a su belleza? El conocimiento no resta, suma.

De las frecuencias visibles de la luz solar, el violeta se dispersa más en la atmósfera, seguido en orden por el azul, el verde, el amarillo, el anaranjado y el rojo. El rojo se dispersa sólo una décima parte de lo que se dispersa el violeta. Aunque la luz violeta se dispersa más que la azul, tus ojos no son muy sensibles a la luz violeta. Por tanto, la luz azul dispersada es lo que predomina en tu visión, y el cielo se ve azul.

El azul del cielo varía en lugares diferentes bajo condiciones distintas. Un factor principal es el contenido de vapor de agua de la atmósfera. En días claros y secos, el cielo es de un azul más oscuro que en los días claros con humedad alta. En lugares donde el aire superior es excepcionalmente seco, como en Italia y Grecia, hermosos cielos azules han inspirado a pintores durante siglos. Donde la atmósfera contiene muchas partículas de polvo y otras partículas más grandes que las moléculas de oxígeno y nitrógeno, la luz de las frecuencias más bajas también se dispersa mucho. Esto hace al cielo menos azul y adopta un aspecto blancuzco. Después de una fuerte tormenta, cuando las partículas se han eliminado, el cielo se vuelve de un azul más oscuro.

La niebla grisácea en los cielos de las grandes ciudades es resultado de las partículas emitidas por los motores de automóviles y camiones, y por las fábricas. Incluso cuando está al ralentí, un típico motor de gasolina de un automóvil emite más de 100 mil millones de partículas por segundo. La mayor parte de las partículas son invisibles, pero actúan como pequeños centros hacia los cuales se adhieren otras partículas. Éstos son los principales dispersores de la luz de frecuencia más baja. Las partículas más grandes absorben la luz en vez de dispersarla, y se produce una neblina marrón. ¡Guácala!

**PUNTO DE CONTROL**

**Las montañas oscuras distantes son azuladas. ¿Cuál es la fuente de este azul? (*Sugerencia*: ¿qué hay entre tú y las montañas que ves?)**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Si observas montañas oscuras a la distancia, te llega muy poca luz proveniente de ellas, y predomina lo azul de la atmósfera que hay entre tú y ellas. ¡Lo azul que atribuyes a las montañas en realidad es el azul del "cielo" a baja altitud entre tú y las montañas!

## 27.7 Por qué los atardeceres son rojos

La luz que no se dispersa es luz que se transmite. Puesto que las luces roja, anaranjada y amarilla son las que menos dispersa la atmósfera, la luz de estas frecuencias más bajas se transmite mejor por el aire. El rojo, que se dispersa menos (y, por tanto, se transmite más), atraviesa más atmósfera que cualquier otro color. De modo que cuanto más gruesa sea la atmósfera por la cual viaja un haz de luz solar, más componentes de frecuencia más alta de la luz se dispersan del haz. Esto significa que la luz que pasa mejor es la roja. Como muestra la Figura 27.18, la luz solar viaja a través de más atmósfera al atardecer, y es por esto por lo que los atardeceres (y amaneceres) son rojos.

A mediodía, la luz solar viaja a través de una menor cantidad de atmósfera para llegar a la superficie de la Tierra. Sólo una pequeña cantidad de luz con frecuencia alta se dispersa de la luz solar, suficiente como para hacer que el Sol parezca amarillento. A medida que el día avanza y el Sol desciende en el cielo, la trayectoria a través de la atmósfera se incrementa, y más violeta y azul se dispersan de la luz solar. La eliminación del violeta y el azul dejan la luz transmitida más roja. El Sol se vuelve cada vez más rojo, y pasa de amarillo a anaranjado y por último a un rojo-naranja al atardecer. Los atardeceres y los amaneceres son inusualmente coloridos después de una erupción volcánica porque, entonces, en el aire son más abundantes las partículas más grandes que las moléculas atmosféricas.

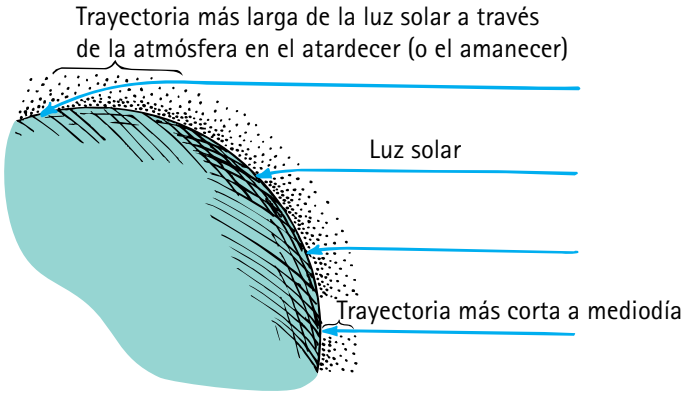



**FIGURA 27.18**
Un rayo de Sol tiene que atravesar una mayor cantidad de atmósfera en el atardecer que al mediodía. Por consiguiente, más azul se dispersa del rayo en el atardecer que al mediodía. Para cuando el rayo inicialmente de luz blanca llega al suelo, sólo la luz de las frecuencias más bajas sobrevive y produce un atardecer rojo.

Los colores del atardecer son congruentes con las reglas de la mezcla de colores. Cuando el azul se resta de la luz blanca, el color complementario que queda es amarillo. Cuando se resta el violeta de frecuencia más alta, el color complementario resultante es anaranjado. Cuando se resta el verde de frecuencia media, queda magenta. Las combinaciones de los colores resultantes varían con las condiciones atmosféricas, que cambian día a día, lo que brinda una variedad de atardeceres para disfrutar.

¿Por qué se ve el azul dispersado cuando el fondo es oscuro, pero no cuando el fondo es claro? Porque el azul dispersado es tenue. Un color tenue se verá contra un fondo oscuro, pero no contra un fondo claro. Por ejemplo, cuando observas desde la superficie de la Tierra la atmósfera contra la oscuridad del espacio, la atmósfera es azul cielo. Pero los astronautas que miran hacia abajo a través de la misma atmósfera, hacia la superficie brillante de la Tierra, no ven el mismo azul.

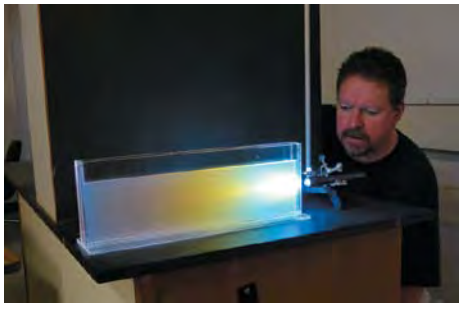
**pti**

- El hollín atmosférico calienta la atmósfera de la Tierra al absorber luz mientras enfría regiones locales al impedir que la luz solar llegue al suelo. Las partículas de hollín en el aire pueden disparar lluvias severas en una región y causar sequías y tormentas de polvo en otra.

**FIGURA 27.19**
El cielo del atardecer es rojo por la ausencia de luz de alta frecuencia, que se dispersó más lejos del horizonte.

## PRACTICANDO LA FÍSICA

Para simular un atardecer, llena una pecera con agua en la que hayas puesto un poco de leche. Algunas gotas bastarán. Después, haz lo mismo que Dean Baird y dirige el haz de una linterna a través del agua y verás que parece azulado si lo miras desde un lado. Las partículas de leche se comportan como moléculas en la atmósfera y dispersan las frecuencias de luz más altas del haz. La luz que sale del otro extremo del tanque tendrá un tinte rojizo. Si miras el haz desde el extremo izquierdo del tanque, verás un color de atardecer anaranjado. Esa es la luz que no se dispersó.



**pti**

- Hay una nueva pintura marrón que refleja luz infrarroja, pero absorbe luz visible. Dado que más de la mitad de la potencia de la luz solar está en el infrarrojo, los techos cubiertos con esta pintura se llaman "techos fríos", pues reducen el gasto de energía en acondicionadores de aire. El mismo color "frío" de automóviles, aceras y pavimentos también promueve la ecología y el cuidado del planeta.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Si las moléculas del cielo dispersaran más luz de frecuencia baja que luz de frecuencia alta, ¿de qué color sería el cielo? ¿De qué color serían los atardeceres?**
2. **Las montañas distantes cubiertas de nieve reflejan mucha luz y son brillantes. Las muy distantes parecen amarillentas. ¿Por qué? (*Sugerencia*: ¿Qué sucede con la luz blanca reflejada cuando viaja de las montañas hacia ti?)**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Si la luz de frecuencia baja se dispersara, el cielo nocturno parecería anaranjado rojizo. Al atardecer, más rojos se dispersarían por la trayectoria más larga de la luz solar, y la luz solar sería predominantemente azul y violeta. ¡De modo que los atardeceres parecerían azules!
2. Las brillantes montañas cubiertas con nieve parecen amarillas porque el azul de la luz blanca que reflejan se dispersa en su camino hacia ti. Para cuando la luz llega a ti, es débil en las frecuencias altas y fuerte en las frecuencias bajas; por tanto, es amarillenta. Las montañas cubiertas de nieve que están mucho más alejadas tienen un tinte anaranjado por la misma razón que un atardecer parece anaranjado.

**FIGURA 27.20**
Una nube está compuesta de gotas de agua mucho más grandes que las partículas diminutas que principalmente dispersan la luz. De modo que la reflexión y la refracción de la luz dominan, lo que produce nubes que generalmente son blancas.

## 27.8 Por qué las nubes son blancas

Las gotas de agua son mucho más grandes que cada una de las moléculas y se comportan de manera diferente. En lugar de la dispersión que ocurre con las partículas diminutas, las gotas de agua principalmente refractan y reflejan la luz de todos los colores de una manera más o menos equitativa. El resultado es una nube blanca.

Cada gota absorbe una pequeña fracción de la luz que la golpea, de modo que con suficientes gotas hay mucha absorción. Es muy poca la luz que logra pasar a través de una nube muy grande, por lo que ésta parece oscura. Una nube también puede oscurecerse si está en la sombra de otra nube. Si aumenta más el tamaño de las gotas, éstas caen en forma de lluvia.

La próxima vez que estés admirando un nítido cielo azul, o te deleites con las formas de las nubes brillantes, u observes un hermoso atardecer, piensa en todos esos ultradiminutos diapasones ópticos en vibración, ¡apreciarás todavía más estas maravillas cotidianas de la naturaleza!

## 27.9 Por qué el agua es azul verdoso

A menudo observas un hermoso azul oscuro cuando miras la superficie de un lago o el océano. Pero ese no es el color del agua; es el color reflejado por el cielo. El color del agua en sí, como puedes ver si observas un pedazo de material blanco bajo el agua, es un pálido azul verdoso.

Aunque el agua es transparente a la luz de casi todas las frecuencias visibles, absorbe intensamente ondas infrarrojas. Es por esto que las moléculas de agua resuenan a las frecuencias del infrarrojo. La energía de las ondas infrarrojas se transforma en energía interna en el agua, por lo que la luz solar calienta el agua. Las moléculas de agua resuenan un poco en el rojo visible, lo que hace que la luz roja sea absorbida en el agua con un poco más de intensidad que la luz azul. La luz roja se reduce a un cuarto de su brillo inicial en 15 metros de agua. Hay muy poca luz roja en la luz solar que penetre por debajo de los 30 metros de agua. Cuando el rojo se elimina de la luz blanca, ¿qué color queda? Esta pregunta puede plantearse de otra forma: ¿cuál es el color complementario

del rojo? El color complementario del rojo es el cian: verde azulado. En el agua de mar, todo a estas profundidades tiene color cian.

Muchos cangrejos y otras criaturas marinas que parecen negras en el agua profunda se descubre que son rojas cuando suben a la superficie. A estas profundidades, negro y rojo parecen iguales. Al parecer, el mecanismo de selección de la evolución no podía distinguir entre negro y rojo a tales profundidades del océano.

Si bien el color verde-azulado del agua se produce por la absorción selectiva de la luz, el azul asombrosamente vívido de los lagos de las Montañas Rocosas canadienses se debe a la dispersión.[3] Los lagos se alimentan de escurrimientos de los glaciares

**pti**

- Los colores otoñales de algunos árboles se deben al rompimiento de la clorofila de sus hojas y a la redistribución de nutrientes hacia las raíces del árbol para almacenarlos en el invierno. A medida que el verde se extrae de las hojas, el amarillo comienza a aparecer, que puede cambiar a rojo, anaranjado o morado por la acidez de otras sustancias químicas de la hoja. De modo que cada otoño, los árboles se preparan para el invierno "durmiendo" en un manto de gloria flamígera.

**FIGURA 27.21**
El agua es cian porque absorbe la luz roja. La espuma de las olas es blanca porque, al igual que las nubes, está compuesta de varias gotas de agua diminutas que dispersan la luz de todas las frecuencias visibles.

fundidos que contienen finas partículas de cieno, denominado harina de roca, que queda suspendido en el agua. La luz se dispersa en estas pequeñas partículas y brinda al agua su color extrañamente vívido (Figura 27.22). (¡A los turistas que fotografían estos lagos se les aconseja informar a sus procesadores de fotografías que no ajusten el color a un azul "real"!)

Es bastante interesante que el color que vemos no es el que está en el mundo a nuestro alrededor; el color está en nuestras cabezas. El mundo está lleno de un montaje de vibraciones: ondas electromagnéticas que estimulan la sensación de color cuando las vibraciones actúan de manera recíproca con las antenas de recepción de forma cónica de las retinas de nuestros ojos. Qué bueno que las interacciones ojo-cerebro producen los hermosos colores que vemos.

**FIGURA 27.22**
El extraordinario azul de los lagos de las Montañas Rocosas canadienses se produce por la dispersión de partículas extremadamente finas de cieno glacial suspendido en el agua.

**PUNTO DE CONTROL**

**De estas fuentes de luz azul (a) una pantalla de televisión, (b) el cielo y (c) los lagos de las Montañas Rocosas canadienses, ¿cuáles se deben a dispersión?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

(b) y (c).

[3]La dispersión por pequeñas partículas ampliamente espaciadas en los iris de los ojos azules, en lugar de algún pigmento, explican su color. La absorción por pigmentos explica los ojos color café.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Colores primarios aditivos.** Los tres colores (rojo, azul y verde) que, cuando se suman en ciertas proporciones, producen cualquier otro color en la parte de luz visible del espectro electromagnético y pueden mezclarse de manera equitativa para producir luz blanca.

**Colores complementarios.** Cualesquiera dos colores de igual brillo que, cuando se suman, producen la sensación de luz blanca.

**Colores primarios sustractivos.** Los tres colores de pigmentos absorbentes (magenta, amarillo y cian) que, cuando se mezclan en ciertas proporciones, pueden reflejar cualquier otro color en la parte de luz visible del espectro electromagnético.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 27.1 Color en el mundo

1. ¿Cuál tiene la frecuencia más alta: la luz roja o la luz azul?

### 27.2 Reflexión selectiva

2. ¿Qué ocurre cuando los electrones exteriores que zumban alrededor del núcleo atómico encuentran ondas electromagnéticas?
3. ¿Qué sucede con la luz cuando cae sobre un material que tiene una frecuencia natural igual a la frecuencia de la luz?
4. ¿Qué sucede con la luz cuando cae sobre un material que tiene una frecuencia natural por arriba o debajo de la frecuencia de la luz?

### 27.3 Transmisión selectiva

5. ¿Qué color de luz se transmite a través de un pedazo de vidrio rojo?
6. ¿De qué manera un pigmento afecta la luz?
7. ¿Cuál se calienta con más rapidez en la luz solar: un pedazo de vidrio sin color o uno con color? ¿Por qué?

### 27.4 Mezcla de luces de colores

8. ¿Cuál es la evidencia que sustenta la afirmación de que la luz blanca está compuesta de todos los colores del espectro?
9. ¿Cuál es el color del pico de frecuencia de la radiación solar?
10. ¿A qué color de luz son más sensibles tus ojos?
11. ¿Qué es una curva de radiación?
12. ¿Qué rangos de frecuencia de la curva de radiación ocupan las luces roja, verde y azul?
13. ¿Por qué al rojo, el verde y el azul se les llama colores primarios aditivos?
14. ¿Cuál es el color resultante de intensidades iguales de luz roja y luz cian combinadas?
15. ¿Por qué al rojo y al cian se les llama colores complementarios?

### 27.5 Mezcla de pigmentos de colores

16. Cuando algo se pinta de rojo, ¿cuál color se absorbe más?
17. ¿Qué son los colores primarios sustractivos?
18. Si observas con una lupa las imágenes de un libro o revista que se imprimen a todo color, observarás tres colores de tinta más el negro. ¿Cuáles son estos colores?

### 27.6 Por qué el cielo es azul

19. ¿Cuál interactúa más con los sonidos de tono alto: las campanas pequeñas o las campanas grandes?
20. ¿Cuáles interactúan más con la luz de alta frecuencia: las partículas pequeñas o las partículas grandes?
21. ¿Por qué el cielo normalmente parece azul?
22. ¿Por qué el cielo en ocasiones parece blancuzco?

### 27.7 Por qué los atardeceres son rojos

23. ¿Por qué el Sol parece rojizo al atardecer y al amanecer, pero no al mediodía?
24. ¿Por qué el color de los atardeceres varía de un día a otro?

### 27.8 Por qué las nubes son blancas

25. ¿Qué explica lo blanco de una nube, la dispersión o la reflexión?
26. ¿Cuál es el efecto sobre el color de una nube cuando ésta contiene abundantes gotas grandes?

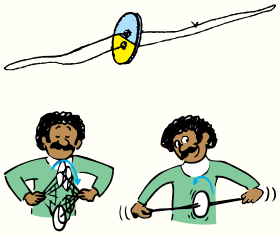
### 27.9 Por qué el agua es azul verdoso

27. ¿Qué parte del espectro electromagnético es más absorbida por el agua?
28. ¿Qué parte del espectro electromagnético *visible* es más absorbido por el agua?
29. ¿Qué color resulta cuando el rojo se sustrae de la luz blanca?
30. ¿Por qué el agua parece cian?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

31. Mira fijamente una hoja de papel de color más o menos durante 45 segundos. Luego observa una superficie toda blanca. Los conos en tu retina que son receptivos al color del papel se fatigan (se agota una sustancia química que percibe la luz y que se repone en forma lenta), por lo que ves una post-imagen del color complementario cuando miras una superficie blanca. Esto ocurre porque los conos fatigados envían una señal más débil al cerebro. Todos los colores producen blanco, pero todos los colores menos uno producen el complemento del color faltante. ¡Inténtalo y observa!
32. Recorta un disco de algunos centímetros de diámetro en un pedazo de cartulina; perfora dos orificios un poco lejos

del centro, del tamaño suficiente para que pase un trozo de cordel como se muestra en el dibujo. Gira el disco como se muestra, de modo que la cuerda se enrede como una banda de caucho sobre un avión de modelismo. Luego, si jalas la cuerda para tensarla, el disco girará.



Si la mitad del disco es de color amarillo y la otra mitad es azul, cuando gire los colores se mezclarán y parecerá casi blanco. (Cuán cerca del blanco depende de los tonos de los colores.) Intenta esto para colores complementarios.

33. Cubre los extremos de un tubo de cartón con papel metálico. Luego, con un lápiz, perfora un orificio en cada extremo, uno aproximadamente de 3 milímetros de diámetro y el otro el doble de grande. Acércate al orificio pequeño y mira por el tubo los colores de las cosas contra el fondo negro del tubo. Verás colores que parecen muy diferentes de cómo aparecen contra fondos ordinarios.
34. Envía un mensaje a la abuela y cuéntale qué detalles aprendiste que explican por qué el cielo es azul, los atardeceres son rojos y las nubes son blancas. Analiza si esta información aumenta o disminuye tu percepción de la belleza de la naturaleza.

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

35. ¿Qué color de luz visible tiene la longitud de onda más larga? ¿La longitud de onda más corta?
36. ¿Por qué los científicos del color no mencionan el negro y el blanco como colores?
37. ¿Por qué los interiores de los instrumentos ópticos son intencionalmente negros?
38. Los camiones de bomberos solían ser rojos. Ahora el color preferido es amarillo-verde. ¿Por qué el cambio?
39. Las pelotas de tenis solían ser blancas. ¿Cuál es su color actual y por qué?
40. ¿De qué color parece ser la ropa roja cuando se ilumina con luz solar? ¿Con luz de una señal de neón roja? ¿Con luz cian?
41. ¿Por qué una hoja de papel blanca parece blanca en luz blanca, roja en luz roja, azul en luz azul, y así sucesivamente con cada color?
42. Un proyector está cubierto de modo que no transmitirá luz amarilla desde su filamento al rojo blanco. ¿De qué color es el haz de luz saliente?
43. ¿Cómo podrías aprovechar los proyectores en una obra de teatro para cambiar de manera súbita el vestuario de los actores de amarillo a negro?
44. ¿La televisión de color funciona mediante adición de color o sustracción de color? Defiende tu respuesta.
45. En una pantalla de televisión, puntos rojos, verdes y azules de materiales fluorescentes se iluminan con una diversidad de intensidades relativas para producir un espectro completo de colores. ¿Qué puntos se activan para producir amarillo? ¿Magenta? ¿Blanco?
46. ¿Qué colores de tinta usan las impresoras de inyección de tinta para producir un rango completo de colores? ¿Los colores se forman con la adición de color o la sustracción de color?
47. El alumbrado público que utiliza vapor de sodio a presión alta produce luz que es principalmente amarilla con algo de rojo. ¿Por qué las patrullas de policía color azul oscuro no son aconsejables en una comunidad que usa este alumbrado público?
48. ¿En cuál de estos casos un plátano maduro parecerá negro: cuando se ilumina con luz roja, amarilla, verde o azul?
49. ¿Qué color de luz se transmitirá a través de filtros cian y magenta traslapados?
50. Observa tus pies rojos quemados por el Sol cuando están bajo el agua. ¿Por qué no se ven tan rojos como cuando están afuera del agua?
51. ¿Por qué la sangre de los buzos lesionados en aguas profundas parece de color negro verdosa en las fotografías submarinas tomadas con luz natural, pero roja cuando se usa flash?
52. Con referencia a la Figura 27.9, completa las siguientes ecuaciones:

    Luz amarilla + luz azul = luz _____

    Luz verde + luz _____ = luz blanca

    Magenta + amarilla + cian = luz _____

53. Revisa la Figura 27.9 para ver si los primeros tres enunciados son correctos. Luego completa el último enunciado. (Todos los colores se combinan por la adición de luz.)

    Rojo + verde + azul = blanco

    Rojo + verde = amarillo = blanco − azul

    Rojo + azul = magenta = blanco − verde

    Verde + azul = cian = blanco − _____

54. Tu amigo dice que las luces roja y cian producen luz blanca porque el cian es verde + azul y, por tanto, rojo + verde + azul = blanco. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo, y por qué?
55. Cuando luz blanca alumbra sobre tinta roja seca sobre una placa de vidrio, el color que se transmite es rojo. Pero el color que se refleja no es rojo. ¿Cuál es?
56. En la playa, puedes quemarte con el Sol mientras estás bajo la sombra de una sombrilla. ¿Cuál es tu explicación?
57. En ocasiones, los pilotos usan gafas que transmiten luz amarilla y absorben luz de la mayoría de los demás colores. ¿Por qué esto los ayuda a ver con más claridad?
58. ¿La luz viaja más rápido a través de la atmósfera inferior o a través de la atmósfera superior?
59. Tu amigo dice que la razón por la que las montañas oscuras distantes parecen azules es porque miras el cielo entre tú y las montañas. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?

60. ¿Por qué el humo de una fogata parece azul contra los árboles cerca del suelo, pero amarillo contra el cielo?
61. Comenta este enunciado: "Oh, ese hermoso atardecer rojo son sólo los colores restantes que no se dispersaron en su camino a través de la atmósfera".
62. Si el cielo en un determinado planeta del sistema solar usualmente fuese anaranjado, ¿de qué color serían los atardeceres?
63. Las emisiones volcánicas arrojan finas cenizas en el aire que dispersan la luz roja. ¿De qué color se verá una Luna llena a través de estas cenizas?
64. ¿Qué explica que algunas nubes sean blancas y otras oscuras?
65. ¿Por qué la espuma de la cerveza de raíz es blanca, en tanto que la bebida es marrón oscuro?
66. Las partículas muy grandes, como las gotas de agua, absorben más radiación de la que dispersan. ¿Cómo se relaciona esto con la oscuridad de las nubes de lluvia?
67. ¿Cómo se vería la blancura de la nieve si la atmósfera de la Tierra fuese varias veces más densa?
68. La atmósfera de Júpiter tiene más de 1,000 km de grosor. Desde la superficie de Júpiter, ¿esperarías ver un Sol blanco?
69. Los amaneceres son rojos por la misma razón que los atardeceres son rojos. Pero los atardeceres suelen ser más coloridos que los amaneceres, en especial cerca de las ciudades. ¿Cuál es tu explicación?
70. Le explicas a un niño en la playa por qué el agua tiene color cian. El niño apunta a las partes blancas de las olas que revientan y te pregunta por qué son blancas. ¿Cuál es tu respuesta?

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

71. En una boutique que sólo tiene iluminación fluorescente, una cliente insiste en llevar un vestido a la puerta de entrada para verlo a la luz del día y comprobar su color. Discute si tiene razón.
72. ¿Por qué la pintura roja es roja?
73. ¿Por qué las hojas de una rosa roja se calentarán más que los pétalos cuando se iluminan con luz roja? Discute cómo se relaciona esto con las personas en el desierto caliente que usan ropas blancas.
74. Si la luz solar de algún modo fuese verde en lugar de blanca, ¿qué color de ropa sería más aconsejable en un incómodo día caluroso? ¿En un día muy frío?
75. La curva de radiación del Sol (consulta las Figuras 27.7 y 27.8) muestra que la luz más brillante del Sol es amarillo-verde. ¿Por qué entonces el Sol no se ve amarillo-verde?
76. Supón que dos haces de linterna alumbran sobre una pantalla blanca, uno a través de un panel de vidrio azul y el otro a través de un panel de vidrio amarillo. ¿Qué color aparece sobre la pantalla donde los dos haces se traslapan? En vez de ello, supón que los dos paneles de vidrio se colocan en el haz de una sola linterna. Discute qué colores aparecen entonces.
77. Tu amigo razona que la mezcla de pinturas magenta y amarillo producirá rojo, porque el magenta es una combinación de rojo y azul, y el amarillo es una combinación de rojo y verde, y que el color común es rojo. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo, y por qué?
78. En una de las fotografías al inicio de este capítulo aparece la escritora científica Suzanne Lyons con su hijo Tristán, quien viste de rojo, y su hija Simone, quien viste de verde. Observa que el negativo de la fotografía muestra estos colores de manera diferente. Discute y explica.
79. Observa con atención una bandera estadounidense. Luego voltea la vista hacia un área blanca sobre una pared. ¿Qué colores que ves en la imagen de la bandera aparecen sobre la pared?
80. ¿Por qué no puedes ver las estrellas durante el día?
81. ¿Por qué el cielo es de un azul más oscuro cuando estás a mayores altitudes? (*Sugerencia*: ¿de qué color es el "cielo" en la Luna?)
82. En la Luna no hay atmósfera que produzca dispersión de la luz. Discute cómo se vería el cielo diurno de la Luna si se viera desde la superficie de la Luna.
83. ¿Las estrellas pueden verse desde la superficie de la Luna en el "día", cuando brilla el Sol?
84. Discute el color de la puesta de Sol vista desde la Luna.

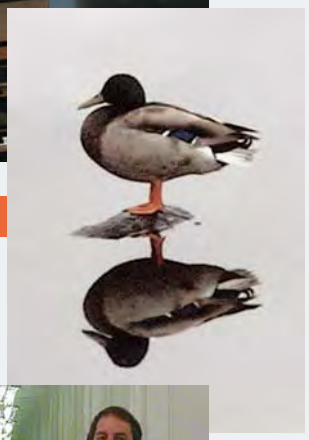
28

CAPÍTULO 28

# Reflexión y refracción


28.1 Reflexión
28.2 La ley de reflexión
28.3 Refracción
28.4 La causa de la refracción
28.5 La dispersión y los arcoíris
28.6 Reflexión total interna
28.7 Lentes
28.8 Defectos en las lentes


1

2


3

4

1 Peter Hopkinson despierta el interés de los alumnos con esta alocada demostración de pararse a horcajadas sobre un gran espejo al tiempo que levanta la pierna derecha mientras la pierna izquierda, que no se ve, le brinda apoyo detrás del espejo. 2 ¿Por qué las patas del pato, pero no sus pies, se ven en el reflejo? 3 El profesor de física Fred Myers está de pie entre espejos paralelos y toma una fotografía de su hija McKenzie, quien es ingeniera en diseño. 4 ¿Cuántos espejos producen estas reflexiones múltiples de la profesora de física texana Karen Jo Matsler?

El abogado y matemático francés Pierre de Fermat nació en 1601. Asistió a la Université de Toulouse antes de mudarse a Bordeaux en su segundo decenio de vida. Hablaba latín, griego, italiano y español, y fue muy reconocido por sus versos escritos en varios idiomas.

En 1629 realizó importantes trabajos matemáticos acerca de las ideas de máximos y mínimos que resultaron ser de utilidad para Newton, así como para Leibniz, cuando de manera independiente desarrollaron el cálculo. A través de su correspondencia con Blaise Pascal en 1654, Fermat ayudó a sentar los cimientos fundamentales de la teoría de la probabilidad.

Para los matemáticos, Fermat es mejor recordado por su famoso "último teorema", del cual un caso especial afirma que la suma de dos cubos de números enteros no puede ser igual al cubo de otro número entero. Durante más de 300 años, los matemáticos estuvieron atormentados por una nota al margen escrita en latín en uno de los libros de Fermat, que se tradujo como: "tengo una prueba verdaderamente magnífica de esta premisa que no cabe en este estrecho margen". El teorema no se demostró sino hasta 1994 (por parte de Andrew Wiles, de la Universidad de Princeton) con métodos que no estaban al alcance de Fermat, de modo que parece improbable que Fermat en realidad haya tenido una prueba. Esto no disminuye el genio que mostró en muchas otras formas.

Fermat tuvo una manera única de observar las trayectorias de luz. Afirmó que, de todas las posibles trayectorias que la luz puede recorrer de un punto a otro, recorre la trayectoria que necesita el tiempo mínimo. La reflexión y la refracción, los temas centrales de este capítulo, se entienden muy bien con este principio.

## 28.1 Reflexión

Casi ninguna de las cosas que ves a tu alrededor emite luz propia. Son visibles porque reemiten la luz que llega a su superficie procedente de una fuente primaria, como el Sol, una lámpara o una fuente secundaria, como el cielo iluminado. Cuando la luz cae sobre la superficie de un material, o se reemite sin cambio de frecuencia, se absorbe en el material y se convierte en calor.[1] Se dice que la luz se *refleja* cuando regresa hacia el medio del cual provino; este proceso es la **reflexión**.

Cuando la luz solar o la luz de una lámpara alumbran la impresión sobre una página de papel, los electrones de los átomos del papel y la tinta vibran de modo más enérgico en respuesta a los campos eléctricos oscilatorios de la luz que ilumina. Los electrones energizados reemiten la luz por medio de la cual ves la página. Cuando la página se ilumina con luz blanca, el papel se ve blanco, lo cual revela que los electrones reemiten todas las frecuencias visibles. Ocurre muy poca absorción. La tinta es otra historia. Excepto por un poco de reflexión, **ésta** absorbe todas las frecuencias visibles y, por tanto, se ve negra.

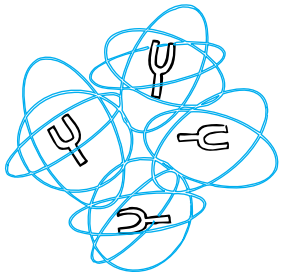


**FIGURA 28.1**
La luz interactúa con los átomos al igual que el sonido interactúa con los diapasones.

### Principio del tiempo mínimo[2]

La idea de que la luz toma la ruta más rápida cuando va de un lugar a otro la formuló Pierre de Fermat. Su idea se llama ahora **principio del tiempo mínimo de Fermat**.

La reflexión puede entenderse con el principio de Fermat. Piensa en la siguiente situación: en la Figura 28.2 se ven dos puntos, A y B, y un espejo plano ordinario debajo. ¿Cómo se puede ir de A a B con la mayor rapidez; esto es: en el menor tiempo? La respuesta es muy simple: ¡ve recto de A a B! Pero, si agregas la condición de que la luz debe golpear el espejo cuando va de A a B en el menor tiempo, la respuesta no es tan sencilla. Una forma sería ir lo más rápido posible hasta el espejo y luego a B, como se muestra con las líneas sólidas de la Figura 28.3. Ésta constituye una trayectoria corta hasta el espejo,

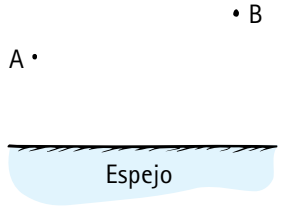



**FIGURA 28.2**

[1]Otro destino menos común es la absorción seguida de la reemisión a frecuencias más bajas: fluorescencia (consulta el Capítulo 30).

[2]Este material y muchos de los ejemplos de tiempo mínimo se adaptaron de R. P. Feynman, R. B. Leighton y M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. I, Cap. 26 (Reading, MA: Addison-Wesley, 1963).

pero una trayectoria muy larga del espejo a B. Si en vez de ello consideras un punto sobre el espejo un poco hacia la derecha, aumentas ligeramente la primera distancia, pero se reduce mucho la segunda distancia, de modo que la longitud de la trayectoria total que se muestra con las líneas discontinuas, y en consecuencia el tiempo de viaje, es menor. ¿Cómo puedes encontrar el punto exacto sobre el espejo con el cual el tiempo sea mínimo? Puedes encontrarlo con mucha facilidad con un truco geométrico.

En el lado opuesto del espejo, construye un punto artificial, B′, que esté a la misma distancia "a través" y abajo del espejo que el punto B que está arriba del espejo (Figura 28.4). La distancia más corta entre A y este punto artificial B′ es muy simple de determinar: es una línea recta. Ahora, esta línea recta interseca el espejo en el punto C, el punto preciso de reflexión para la trayectoria más corta y, por tanto, la trayectoria de tiempo mínimo para el paso de luz de A a B. Un análisis atento demostrará que la distancia de C a B es igual a la distancia de C a B′. Se observa que la longitud de la trayectoria de A a B′ a través de C es igual a la longitud de la trayectoria de A a B rebotando en el punto C.

Un análisis atento de las Figuras 28.4 y 28.5 y un poco de razonamiento geométrico demostrarán que el ángulo de la luz incidente de A a C es igual al ángulo de reflexión de C a B.

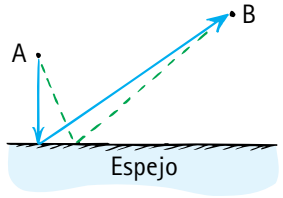



FIGURA 28.3

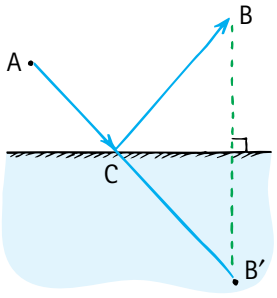



FIGURA 28.4

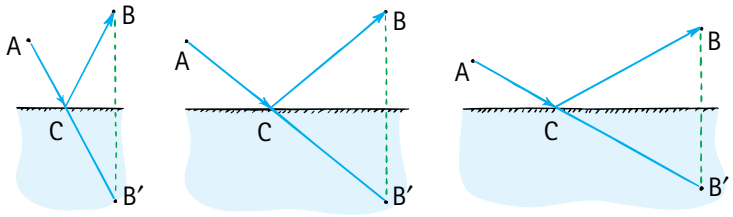



FIGURA 28.5

## 28.2 La ley de reflexión

Como lo demostró Fermat, el ángulo de la luz incidente será el mismo que el ángulo de la luz reflejada. Ésta es la **ley de reflexión** y se sostiene para todos los ángulos (Figura 28.5):

**El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.**

En la Figura 28.6 se ilustra la ley de reflexión con flechas que representan rayos de luz. En lugar de medir los ángulos de los rayos incidente y reflejado desde la superficie reflectora, es habitual medirlos desde una línea perpendicular al plano de la superficie reflectora. Esta línea imaginaria se llama *normal*. El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado se encuentran en el mismo plano. A tal reflexión desde una superficie lisa se le denomina reflexión *especular*. Los espejos producen excelentes reflexiones especulares.

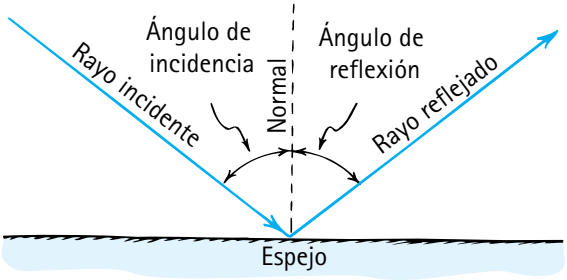



FIGURA 28.6
La ley de reflexión.

Los recubrimientos blancos de los techos reflejan hasta 85% de la luz incidente, lo que en los días de verano reduce mucho los costos del aire acondicionado y las emisiones de carbono. Sin embargo, en los días fríos de invierno, cuando lo que se desea es calor, ésta no es tan buena idea. De modo que, en las regiones con veranos cálidos e inviernos ligeros, ¡pinta los techos de blanco! (Como se mencionó en el Capítulo 27, también hay nuevas pinturas marrón que ayudan a enfriar mediante el reflejo de la luz infrarroja.)

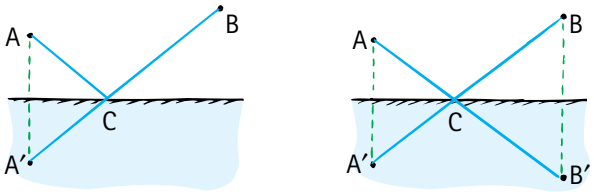
SCREENCAST: Reflexión

**PUNTO DE CONTROL**

**La construcción del punto artificial B′ en las Figuras 28.4 y 28.5 muestra cómo la luz se encuentra con el punto C al reflejarse de A a B. Mediante una construcción similar, demuestra que la luz que se origina en B y se refleja en A también se encuentra con el mismo punto C.**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Construye un punto artificial A′ tan abajo del espejo como A está por arriba de él; luego dibuja una línea recta de B a A′ para encontrar C, como se muestra a la izquierda. Ambas construcciones superpuestas, a la derecha, muestran que C es común a ambas. Se ve que la luz seguirá la misma trayectoria si va en la dirección opuesta. Siempre que veas a los ojos de alguien más en un espejo, ten por seguro que la persona también puede verte a los ojos.



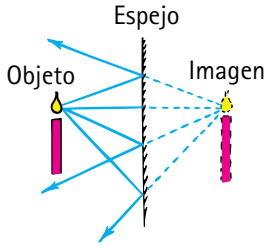




**FIGURA 28.7**
Una imagen virtual se forma detrás del espejo y se ubica en la posición donde convergen los rayos reflejados extendidos (líneas discontinuas).

## Espejos planos

Supón que la llama de una vela se coloca frente a un espejo plano. Los rayos de luz irradian de la llama en todas direcciones. La Figura 28.7 sólo muestra cuatro del infinito número de rayos que salen de uno del infinito número de puntos sobre la vela. Estos rayos divergen de la llama de la vela y encuentran el espejo, donde se reflejan en ángulos iguales a sus ángulos de incidencia. Los rayos divergen del espejo y parecen emanar de un punto particular detrás del espejo (donde intersecan las líneas discontinuas). El observador ve una imagen de la llama en este punto. Los rayos de luz en realidad no se originan en este punto, de modo que la imagen se llama *imagen virtual*. La imagen está tan atrás del espejo como el objeto está enfrente del espejo, y la imagen y el objeto tienen el mismo tamaño. Cuando te ves en un espejo, por ejemplo, el tamaño de tu imagen es el mismo que el tamaño que parecería tener tu gemelo si se ubicara a la misma distancia detrás del espejo que a la que tú estás enfrente del espejo, siempre y cuando el espejo sea plano.

Cuando el espejo es curvo, los tamaños y las distancias del objeto y la imagen ya no son iguales. En este texto no se abordarán los espejos curvos, excepto para decir que la

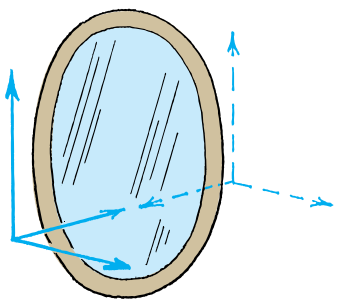


**FIGURA 28.8**
La imagen de Marjorie está tan atrás del espejo como ella está enfrente. Observa que ella y su imagen tienen el mismo color de ropa, evidencia de que la luz no cambia de frecuencia en la reflexión. Es interesante que su eje izquierda-derecha no esté invertido al igual que su eje arriba-abajo. El eje que *sí* se invierte, como se muestra a la derecha, es el eje atrás-adelante. Por esta razón parece como si su mano izquierda estuviera enfrente de la mano derecha de su imagen.

ley de reflexión todavía se aplica. Un espejo curvo se comporta como una sucesión de espejos planos, cada uno en una orientación angular ligeramente diferente del que le sigue. En cada punto, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (Figura 28.9). Observa que, en un espejo curvo, a diferencia de un espejo plano, las normales (que se muestran con las líneas negras discontinuas a la izquierda del espejo) en diferentes puntos sobre la superficie no son paralelas entre sí.

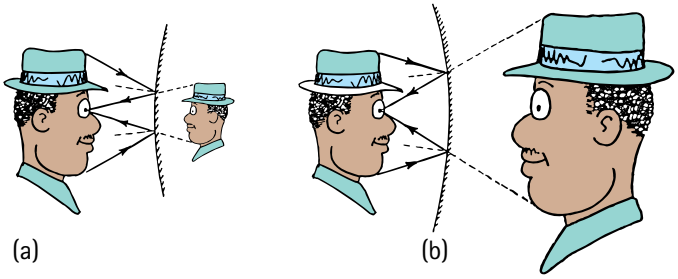



**FIGURA 28.9**
(a) La imagen virtual formada por un espejo *convexo* (un espejo que se curva hacia afuera) es más pequeña y está más cerca del espejo que el objeto.
(b) Cuando el objeto está cerca de un espejo *cóncavo* (un espejo que se curva hacia adentro, como una "cueva"), la imagen virtual es más grande y está más lejos que el objeto. En ambos casos, la ley de reflexión se aplica a cada rayo.

**VIDEO: Formación de imágenes en un espejo**

Sin importar si el espejo es plano o curvo, el sistema ojo-cerebro no puede normalmente diferenciar entre un objeto y su imagen reflejada. Así que la ilusión de que existe un objeto detrás de un espejo (o en algunos casos, enfrente de un espejo cóncavo) se debe tan sólo al hecho de que la luz proveniente del objeto entra en el ojo exactamente de la misma manera, en términos físicos, como habría entrado si el objeto en realidad estuviera en la ubicación de la imagen.

Sólo parte de la luz que golpea una superficie se refleja. Sobre una superficie de vidrio transparente, por ejemplo, y con incidencia normal (luz perpendicular a la superficie), sólo alrededor de 4% se refleja en cada superficie. Sin embargo, en una superficie limpia y pulida de aluminio o plata, se refleja alrededor de 90% de la luz incidente.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Qué evidencia puedes citar que sustente la afirmación de que la frecuencia de la luz no cambia al momento de reflejarse?**
2. **Si quieres tomar una fotografía de tu imagen mientras estás parado 5 m enfrente de un espejo plano, ¿a qué distancia deberás montar tu cámara para obtener el enfoque más nítido?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. El color de una imagen es idéntico al color del objeto que forma la imagen. Cuando te miras en un espejo, por ejemplo, el color de tus ojos no cambia.
2. Monta tu cámara a 10 m; la situación es equivalente a estar de pie a 5 m enfrente de una ventana abierta y ver a tu gemelo de pie a 5 m de la ventana.

## Reflexión difusa

Cuando la luz incide sobre una superficie rugosa o granular, se refleja en muchas direcciones. A esto se le llama *reflexión difusa* (Figura 28.10). Si la superficie es tan lisa que las distancias entre elevaciones sucesivas sobre la superficie son menores que alrededor de un octavo de la longitud de onda de la luz, hay muy poca reflexión difusa, y se dice que la superficie está *pulida*. Por tanto, una superficie puede pulirse para una radiación con una longitud de onda larga pero no puede pulirse para una luz con una longitud de onda corta. El "plato" de malla de alambre que se muestra en la Figura 28.11 es muy rugoso para las ondas de luz, por lo que difícilmente sería como un espejo, pero para las ondas de radio con longitud

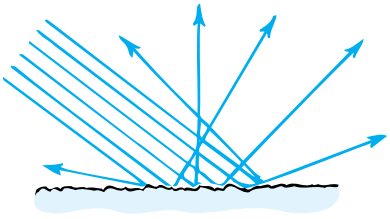


**FIGURA 28.10**
Reflexión difusa. Si bien cada rayo obedece la ley de reflexión, los muchos y diferentes ángulos superficiales que encuentran los rayos de luz cuando golpean la superficie rugosa producen reflexión en muchas direcciones.

**FIGURA 28.11**
El plato parabólico de malla abierta es un reflector difuso para la luz con longitud de onda corta, pero un reflector pulido para ondas de radio con longitud de onda larga.

de onda larga, está "pulido" y, por tanto, es un excelente reflector. La reflexión de las paredes de tu habitación es un buen ejemplo de reflexión difusa. La luz se refleja de vuelta hacia la habitación pero no produce imágenes especulares. A diferencia de la reflexión especular, la reflexión difusa no produce una imagen especular.

La luz que se refleja de esta página es difusa. La página puede ser lisa para una onda de radio, pero es rugosa para una onda de luz. Los rayos de luz que golpean esta página encuentran millones de pequeñas superficies planas que miran en todas direcciones. Por tanto, la luz incidente se refleja en todas direcciones, lo que te permite ver la página u otros objetos desde cualquier dirección. Por ejemplo, puedes ver el camino delante de tu automóvil en la noche por la reflexión difusa de la superficie del camino. Cuando el camino está húmedo, la reflexión difusa es menor y es más difícil ver. La mayor parte de tu entorno se ve gracias a la reflexión difusa.

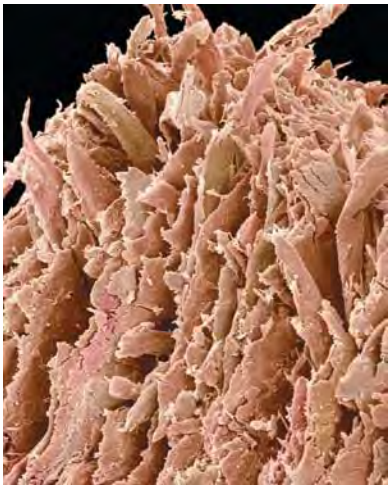


**FIGURA 28.12**
Vista amplificada de la superficie del papel ordinario.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Cómo es que la superficie del agua de un lago puede mostrar tanto reflexión especular como difusa?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Donde el agua está muy tranquila y la superficie está lisa, ocurren imágenes reflejadas. Esta es reflexión especular. Donde el agua es rugosa y no muestra imágenes reflejadas, la reflexión es difusa.

## 28.3 Refracción

Recuerda del Capítulo 26 que la rapidez promedio de la luz es más baja a través de vidrio y otros materiales transparentes que a través del espacio vacío. La luz viaja con distintas rapideces en diferentes materiales. Viaja a 300,000 km/s en el vacío, con una rapidez un poco menor en el aire, y a tres cuartos de dicha rapidez en el agua. En un diamante, la luz viaja a cerca de 40% de su rapidez en el vacío. Cuando la luz se dobla al pasar de manera oblicua de un medio a otro, el proceso se llama **refracción**. Es común observar que un rayo de luz se doble y tome una ruta más larga cuando encuentra vidrio o agua en un ángulo oblicuo. No obstante, la trayectoria más larga tomada es, a pesar de ello, la trayectoria que necesita el tiempo mínimo. Una trayectoria en línea recta tardaría un tiempo más prolongado. Esto se puede ilustrar con la siguiente situación.

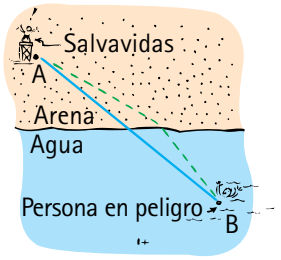



**FIGURA 28.13**
Refracción.

Imagina que eres un salvavidas en una playa y observas que una persona corre peligro en el agua. En la Figura 28.13 se muestran tu posición relativa, la de la orilla de la playa y la de la persona en peligro. Tú estás en el punto A y la persona está en el punto B. Puedes correr más rápido de lo que puedes nadar. ¿Debes viajar en línea recta para llegar a B? Un poco de razonamiento demostrará que una trayectoria en línea recta no sería la mejor opción porque, si en vez de ello destinaras un poco más de tiempo para desplazarte más en tierra, ahorrarías mucho más tiempo porque nadarías una distancia más corta en el agua. La trayectoria del tiempo mínimo se muestra con la línea discontinua, que evidentemente no es la de la distancia más corta. Desde luego, la cantidad de curvatura en la orilla de la playa depende de cuánto más rápido puedas correr que nadar. La situación es similar con un rayo de luz incidente sobre un cuerpo de agua, como se muestra en la Figura 28.14. El ángulo de incidencia es mayor que el ángulo de refracción por una cantidad que depende de las rapideces relativas de la luz en el aire y en el agua.

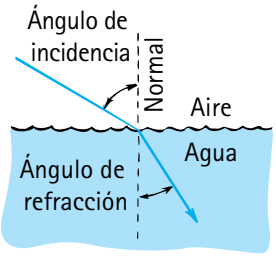



**FIGURA 28.14**
Refracción.

Considera el panel de vidrio grueso de la Figura 28.15. Cuando la luz pase del punto A y atraviese el vidrio hasta el punto B, irá en una trayectoria en línea recta. En este

caso, la luz encuentra el vidrio perpendicularmente, y se ve que la distancia más corta tanto a través del aire como del vidrio corresponde al tiempo más corto. Pero, ¿qué hay de la luz que va del punto A al punto C? ¿Viajará en la línea recta mostrada por la línea discontinua? La respuesta es *no*, porque si lo hace así pasaría más tiempo dentro del vidrio, donde la luz viaja con más lentitud que en el aire. En vez de ello, la luz tomará una trayectoria menos inclinada a través del vidrio. El tiempo ahorrado al tomar la trayectoria resultante más corta a través del vidrio compensa con creces el tiempo que fue necesario agregar para recorrer la trayectoria un poco más larga a través del aire. La trayectoria global es la trayectoria del tiempo mínimo, la trayectoria más rápida. El resultado es un desplazamiento paralelo del haz de luz porque los ángulos de entrada y salida son iguales. Notarás este desplazamiento cuando observes a través de un panel grueso de vidrio en un ángulo. Cuanto más difiera de la perpendicular tu ángulo de visión, más pronunciado será el desplazamiento.

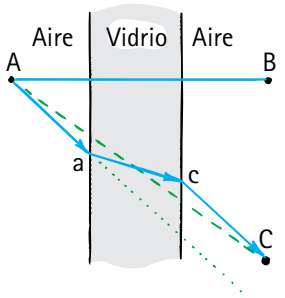



**FIGURA 28.15**
Refracción a través de vidrio. Aunque la línea discontinua AC es la trayectoria más corta, la luz toma una trayectoria un poco más larga a través del aire desde A hasta a, luego una trayectoria más corta a través del vidrio hasta c, y luego a C. La luz que sale está desplazada, pero es paralela a la luz incidente.

Otro ejemplo de interés es el prisma, en el cual las caras opuestas del vidrio no son paralelas (Figura 28.16). La luz que va del punto A al punto B no seguirá la trayectoria en línea recta mostrada con la línea discontinua porque pasaría demasiado tiempo en el vidrio. En vez de ello, la luz seguirá la trayectoria que se muestra con la línea sólida, una trayectoria que es un poco más larga a través del aire y atraviesa una sección más delgada del vidrio para llegar al punto B. Mediante este razonamiento, uno podría pensar que la luz debe tomar una trayectoria más cercana al vértice superior del prisma y buscar el grosor mínimo del vidrio. Pero si lo hiciera, la distancia adicional a través del aire resultaría en un tiempo de viaje global más largo. La trayectoria más rápida seguida es la trayectoria que tarda el tiempo mínimo.

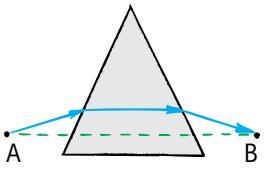



**FIGURA 28.16**
Un prisma.

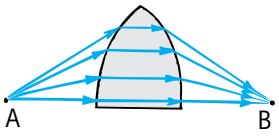



**FIGURA 28.17**
Un "prisma curvo".

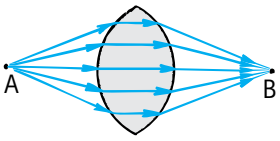



**FIGURA 28.18**
Una lente convergente.

**SCREENCAST: Refracción**

Es interesante observar que un "prisma adecuadamente curvo" ofrecerá muchas trayectorias que tardan el mismo tiempo desde un punto A en un lado hasta un punto B en el lado opuesto (Figura 28.17). La curva reduce el grosor del vidrio de manera correcta para compensar las distancias adicionales que recorre la luz en puntos más altos sobre la superficie. Para las posiciones adecuadas de A y B, y para la curva adecuada sobre las superficies de este prisma modificado, todas las trayectorias de la luz tardan exactamente el mismo tiempo. En este caso, toda la luz proveniente de A que incide sobre la superficie de vidrio se enfoca sobre el punto B. Se ve que esta forma es simplemente la mitad superior de una lente convergente (Figura 28.18, que se trata con más detalle después en este capítulo).

Siempre que se observa un atardecer, se ve al Sol durante varios minutos después de que éste se hundió en el horizonte. La atmósfera de la Tierra es delgada en la parte superior y densa en la inferior. Dado que la luz viaja más rápido en aire delgado que en aire denso, la luz del Sol puede llegar a ti más rápidamente si, en lugar de viajar en línea recta, evita el aire más denso y toma una trayectoria más alta y más larga para penetrar la atmósfera en un ángulo más inclinado (Figura 28.19). Puesto que la densidad de la atmósfera cambia de

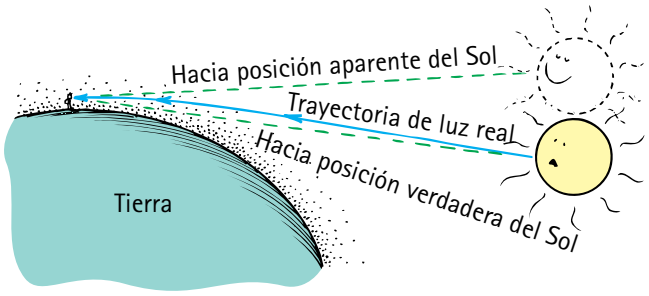



**FIGURA 28.19**
Debido a la refracción atmosférica, cuando el Sol está cerca del horizonte, parece estar más alto en el cielo.

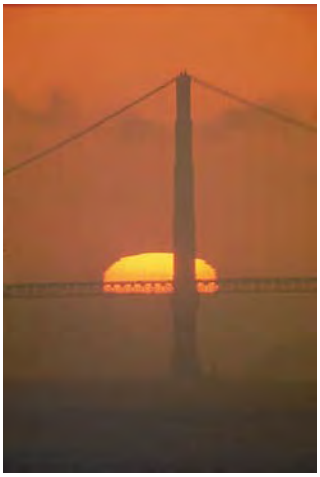


**FIGURA 28.20**
La forma del Sol está distorsionada por la refracción diferencial.

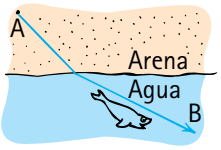
manera gradual, la trayectoria de la luz se dobla gradualmente para producir una trayectoria curva. Es interesante que esta trayectoria del tiempo mínimo te brinde un periodo de luz solar un poco más largo que aquella en la que la luz viaja sin doblarse. Más aún: cuando el Sol (o la Luna) está cerca del horizonte, los rayos provenientes del borde inferior se doblan más que los rayos provenientes del borde superior. Esto produce un acortamiento del diámetro vertical, lo que hace que el Sol parezca tener forma de calabaza (Figura 28.20).

**PUNTO DE CONTROL**

**Supón que el salvavidas del ejemplo anterior fuera una foca en lugar de un ser humano. ¿Cómo diferiría esta trayectoria de tiempo mínimo de A a B?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La foca puede nadar más rápido de lo que puede correr, y su trayectoria se doblaría como se muestra. Lo mismo ocurre con la luz que sale de la parte inferior de un trozo de vidrio hacia el aire.




## Índice de refracción

La luz frena cuando entra en un medio transparente. La cantidad en la que difiere la rapidez de la luz de su rapidez en el vacío está dada por el *índice de refracción*, $n$, del material:

$$n = \frac{\text{rapidez de la luz en el vacío}}{\text{rapidez de la luz en el material}}$$

Por ejemplo, la rapidez de la luz en un diamante es 124,000 km/s, de modo que el índice de refracción para el diamante es

$$n = \frac{300{,}000 \text{ km/s}}{124{,}000 \text{ km/s}} = 2.42$$

Para el vacío, $n = 1$.

Para el vidrio *crown* óptico, común en las gafas, $n$ es 1.52, lo cual significa que la luz frena de la rapidez $c$ en el aire a la rapidez $c/n = c/1.52 = 0.66c$. Cuanto mayor sea $n$, mayor será el doblamiento de la luz en la lente, lo que se traduce en menor grosor de la lente. El valor de $n$ de lentes plásticos de índice alto alcanza 1.76, de modo que la luz frena más y se dobla más, y las lentes pueden hacerse más delgadas —buenas noticias para quienes padecen miopía y quieren gafas más delgadas—. Y ¿qué hay de la rapidez de la luz cuando sale de una lente? Correcto: regresa a casi $c$, la rapidez habitual de la luz en el aire.

La ley de refracción cuantitativa, denominada *ley de Snell*, se acredita a W. Snell, un astrónomo y matemático danés del siglo XVII:

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$$

donde $n_1$ y $n_2$ son los índices de refracción de los medios en cualquier lado de la superficie y $\theta_1$ y $\theta_2$ son los ángulos de incidencia y refracción respectivos. Si se conocen tres de estos valores, el cuarto puede calcularse a partir de esta relación. Tal vez en la parte de laboratorio de tu clase apliques la ley de Snell.

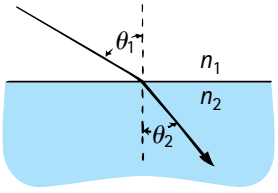



**FIGURA 28.21**
La refracción se relaciona con los índices de refracción en concordancia con la ley de Snell.

## Espejismos

Todo mundo está familiarizado con los espejismos que a veces se observan cuando conduces por un camino caliente. El camino distante parece estar húmedo, pero cuando llegas ahí, el camino está seco. ¿Por qué es esto? El aire es muy caliente justo encima de la superficie de la carretera y más frío arriba. La luz viaja más rápido a través del delgado aire caliente que a través del aire frío superior, que es más denso. De modo que la luz, en lugar de llegar del cielo en líneas rectas, también tiene trayectorias de tiempo mínimo mediante las cuales se curva por un momento hacia la región más caliente cerca del

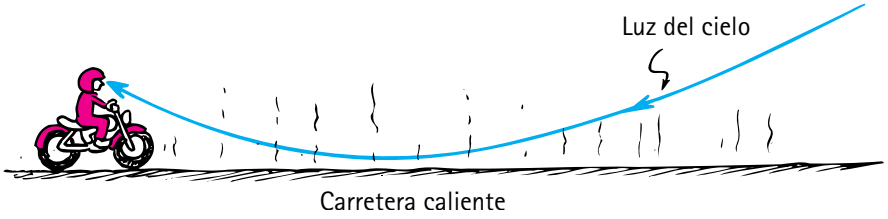



**FIGURA 28.22**
La luz proveniente del cielo adquiere rapidez en el aire cerca del suelo porque el aire es más caliente y menos denso que el aire superior. Cuando la luz roza la superficie y se dobla hacia arriba, el observador ve un espejismo.

camino antes de llegar a tus ojos (Figura 28.22). Donde ves "humedad", en realidad ves el cielo. Un espejismo no es, como muchas personas creen erróneamente, un "truco de la mente". Un espejismo se forma por luz real y puede fotografiarse, como se muestra en la Figura 28.23.

Cuando observas un objeto sobre una estufa caliente o sobre pavimento caliente, ves un efecto ondulatorio reluciente. Esto se debe a las varias trayectorias de tiempo mínimo de la luz conforme pasa a través de varias temperaturas y, por tanto, de densidades variables del aire. El centelleo de las estrellas resulta de fenómenos similares en el cielo, donde la luz atraviesa capas inestables en la atmósfera.

En los ejemplos anteriores, ¿cómo es que la luz aparentemente "sabe" qué condiciones existen y qué compensaciones necesita una trayectoria de tiempo mínimo? Cuando se aproxima a una ventana de vidrio, un prisma o una lente en un ángulo, ¿cómo es que la luz sabe viajar un poco más lejos en el aire para ahorrar tiempo y tomar una trayectoria más corta a través del vidrio? ¿Cómo es que la luz del Sol sabe viajar sobre la atmósfera una distancia adicional antes de tomar un atajo a través del aire más denso y ahorrar tiempo? ¿Cómo es que la luz del cielo sabe que puede llegar a ti en un tiempo mínimo si se zambulle hacia un camino caliente antes de inclinarse hacia arriba y llegar a tus ojos? El principio del tiempo mínimo parece no ser la causa de que la luz tenga una mente propia y pueda "percibir" todas las trayectorias posibles, calcular el tiempo de cada una y elegir la que necesite el tiempo mínimo. ¿Es así? Por intrigante que parezca, existe una explicación más simple que no le asigna esta capacidad previsora a la luz: la refracción simplemente es una consecuencia de que la luz tenga diferentes rapideces promedio en distintos medios.

**FIGURA 28.23**
Un espejismo. La aparente humedad de la carretera no es la reflexión del cielo por el agua sino, más bien, refracción de la luz del cielo que atraviesa el aire más caliente y menos denso cerca de la superficie del camino.

**PUNTO DE CONTROL**

**Si la rapidez de la luz fuera la misma en aire de varias temperaturas y densidades, ¿todavía habría periodos de luz solar un poco más largos, centelleo de las estrellas en la noche, espejismos y soles ligeramente aplanados en los atardeceres?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**
No, porque entonces no ocurriría refracción.

**VIDEO: Modelo de refracción**

## 28.4 La causa de la refracción

La refracción ocurre cuando la rapidez promedio de la luz *cambia* al ir de un medio transparente a otro. Para entender esto, piensa en la acción de un par de ruedas de un carro de juguete que están unidas a un eje conforme las ruedas giran con suavidad colina abajo desde una acera lisa hacia un jardín con césped. Si las ruedas encuentran el césped con un cierto ángulo, como muestra la Figura 28.24, éstas se desvían de su curso en línea recta. Observa que la rueda izquierda frena primero cuando interactúa con el césped. La rueda derecha con mayor rapidez sobre la acera pivotea entonces en torno a la rueda izquierda, que tiene un movimiento más lento. La dirección de las ruedas se dobla hacia la normal (la línea discontinua negra que es perpendicular al lindero entre el césped y la acera en la Figura 28.24).

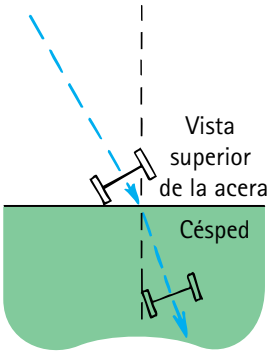



**FIGURA 28.24**
La dirección de las ruedas cambia cuando una rueda frena antes que la otra.

Una onda de luz se dobla en forma similar, como se muestra en la Figura 28.25. Observa la dirección de la luz, indicada por la flecha azul (el rayo de luz) y también observa los *frentes de onda* (rojo) dibujados en ángulos rectos con respecto al rayo. (Recuerda que un frente de onda es una cresta, un valle o cualquier porción continua de una onda.) En la figura la onda encuentra la superficie del agua con un ángulo. Esto significa que la

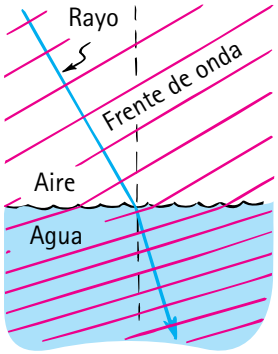



**FIGURA 28.25**
La dirección de las ondas de luz cambia cuando una parte de cada onda frena antes que la otra parte.

porción izquierda de la onda frena en el agua en tanto que el resto en el aire viaja con rapidez *c*. El rayo de luz permanece perpendicular al frente de onda y, por tanto, se dobla en la superficie. Se dobla al igual que las ruedas se doblan cuando se mueven de la acera al césped. En ambos casos, el doblado es una consecuencia de un cambio en la rapidez.

La rapidez cambiante de la luz ofrece una explicación de onda acerca de los espejismos. En la Figura 28.26 se observan muestras de frentes de onda provenientes de la copa de un árbol en un día caluroso. Si la temperatura del aire fuese uniforme, la rapidez promedio de la luz sería la misma en todas partes del aire; la luz que viaja al suelo encontraría el suelo. Pero el aire es más caliente y menos denso cerca del suelo, y los frentes de onda ganan rapidez en su viaje hacia abajo, lo que los hace doblarse hacia arriba. De modo que, cuando el observador mira hacia abajo, ve la copa del árbol; esto es un espejismo.

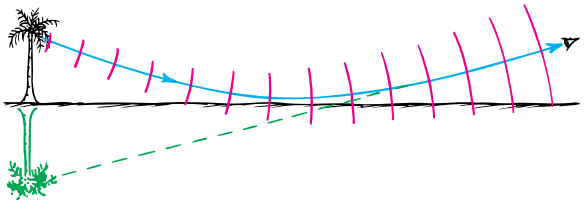


**FIGURA 28.26**
Una explicación de onda de un espejismo. Los frentes de onda de luz viajan más rápido en aire caliente cerca del suelo y se doblan hacia arriba.

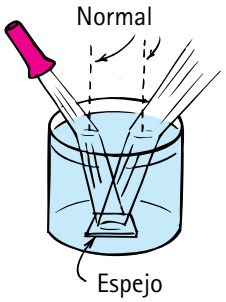



**FIGURA 28.27**
Cuando la luz frena al pasar de un medio a otro, como cuando viaja del aire al agua, se refracta hacia la normal. Cuando gana rapidez al viajar de un medio a otro, como cuando va del agua al aire, se refracta lejos de la normal.

La refracción explica muchas ilusiones. Una común es la de la vara que parece estar doblada cuando se sumerge en forma parcial en el agua. La parte sumergida parece más cerca de la superficie de lo que está en realidad. Lo mismo ocurre cuando ves un pez en el agua; el pez parece próximo a la superficie y aparenta estar más cerca de la posición que realmente tiene (Figura 28.28). Si miras recto hacia abajo en el agua, un objeto sumergido 4 m bajo la superficie parecerá estar a sólo 3 m de profundidad. Debido a la refracción, los objetos sumergidos parecen estar más cerca, de modo que parecen más grandes.

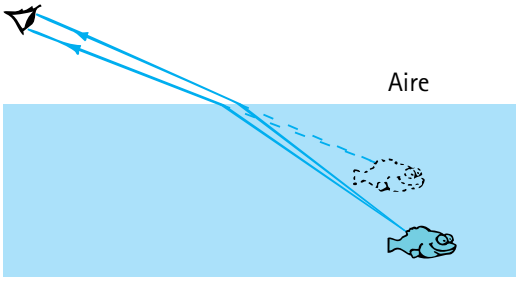



**FIGURA 28.28**
Debido a la refracción, un objeto sumergido parece estar más cerca de la superficie de lo que está en realidad.

Como ves, puedes interpretar el doblado de la luz en la superficie del agua al menos de dos formas. Puedes decir que la luz que sale del pez y llega al ojo del observador lo hace en el tiempo mínimo porque toma una trayectoria más corta hacia arriba, hacia la superficie del agua, y una trayectoria correspondientemente más larga a través del aire. Visto de esta manera, el tiempo mínimo dicta la trayectoria tomada. O puedes decir que las ondas de luz dirigidas hacia arriba en un ángulo hacia la superficie se curvan y se tuercen conforme ganan rapidez cuando salen al aire para llegar al ojo del observador. Visto de este modo, el cambio de rapidez del agua al aire dicta la trayectoria tomada, y esta trayectoria resultó ser una trayectoria de tiempo mínimo. Cualquiera que sea el modo de verlo, los resultados son los mismos.

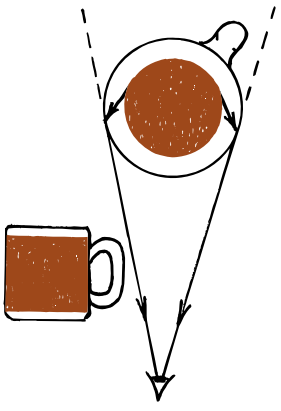


**FIGURA 28.29**
Debido a la refracción, el tarro lleno de cerveza de raíz parece contener más cerveza de la que en realidad tiene.

**PUNTO DE CONTROL**

**Si la rapidez de la luz fuera la misma en todos los medios, ¿de cualquier manera habría refracción cuando la luz pasara de un medio a otro?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

No.

## 28.5 La dispersión y los arcoíris

SCREENCAST: Arcoíris

Se sabe que la rapidez promedio de la luz es menor que $c$ en un medio transparente; cuánto disminuye depende de la naturaleza del medio y de la frecuencia de la luz. La rapidez de la luz en un medio transparente depende de su frecuencia. Recuerda del Capítulo 26 que la luz con frecuencias que coinciden con la frecuencia natural o resonante de los osciladores electrónicos en los átomos y moléculas del medio transparente se absorbe, y la luz con frecuencias cercanas a la frecuencia resonante no se absorbe sino que interactúa más en la secuencia absorción-emisión que la luz con frecuencias más bajas. Como la frecuencia natural o resonante de la mayor parte de los materiales transparentes está en la región ultravioleta del espectro, la luz con frecuencia más alta viaja de un modo más lento que la luz con frecuencia más baja. La luz violeta viaja cerca de 1% más lento en vidrio ordinario que la luz roja. Las ondas de luz con colores entre el rojo y el violeta viajan a sus propias rapideces intermedias.

Dado que la luz con diferentes frecuencias viaja con distintas rapideces en materiales transparentes, se refracta en diferentes cantidades. Cuando la luz blanca se refracta dos veces, como en un prisma, la separación de los diferentes colores de luz es bastante notoria. Esta separación de la luz en colores ordenados de acuerdo con la frecuencia se llama *dispersión* (Figura 28.30). Esto fue lo que permitió a Isaac Newton formar un espectro cuando sostuvo un prisma de vidrio en la luz solar.

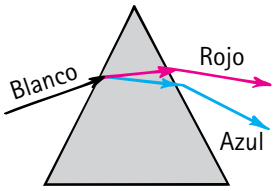



**FIGURA 28.30**
La dispersión con un prisma hace visibles los componentes de la luz blanca.

Uno de los ejemplos más espectaculares de la dispersión es el arcoíris. Para que un arcoíris se vea, el Sol debe brillar en una parte del cielo y las gotas de agua de una nube o de la lluvia que cae deben estar presentes en la parte opuesta del cielo. Cuando le das la espalda al Sol, ves el espectro de colores en un arco. Visto desde un avión cerca del mediodía, el arco forma un círculo completo (con la sombra de un avión de vuelo bajo vista en el centro). Todos los arcoíris serían completamente redondos si el suelo no se interpusiera en su camino.

Los hermosos colores de los arcoíris se dispersan de la luz solar mediante millones de pequeñas gotas de agua esféricas que actúan como prismas. Puedes entender mejor esto si piensas en una sola gota de lluvia, como se muestra en la Figura 28.31. Sigue el rayo de luz solar a medida que entra en la gota cerca de su superficie superior. Parte de la luz se refleja aquí (no se muestra) y el resto se refracta en el agua. En esta primera refracción, la luz se dispersa en sus colores espectrales; el violeta es el que más se desvía y el rojo es el que menos se desvía. Al llegar al otro lado de la gota, cada color se refracta en parte hacia afuera, hacia el aire (no se muestra), y en parte se refleja de vuelta a la gota. Cuando llega a la superficie inferior de la gota, cada color se refleja de nuevo (no se muestra) y se refracta al aire. Esta segunda refracción es similar a la de un prisma, donde la refracción en la segunda superficie aumenta la dispersión ya producida en la primera superficie.

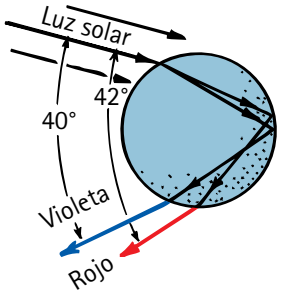



**FIGURA 28.31**
Dispersión de la luz solar por una sola gota de lluvia.

En realidad, pueden haber dos refracciones y una reflexión en el ángulo entre los rayos entrante y saliente, que puede ser algo entre 0° y 42° (0° corresponde a una inversión completa de 180° de la luz). Sin embargo, cerca del ángulo máximo de 42° existe una fuerte concentración de intensidad de luz. Esto es lo que se muestra en la Figura 28.31.

Si bien cada gota dispersa todo un espectro de colores, el observador está en posición de ver la luz concentrada solamente de un solo color de cualquier gota individual (Figura 28.32). Si la luz violeta proveniente de una sola gota llega al ojo del observador, la luz roja proveniente de la misma gota incide en alguna otra parte por debajo de los ojos. Para ver luz roja, uno debe mirar hacia una gota más alta en el cielo. El color rojo se verá cuando el ángulo entre un haz de luz solar y la luz enviada de vuelta por la gota sea de 42°. El color violeta se ve cuando el ángulo entre los haces solares y la luz desviada es de 40°.

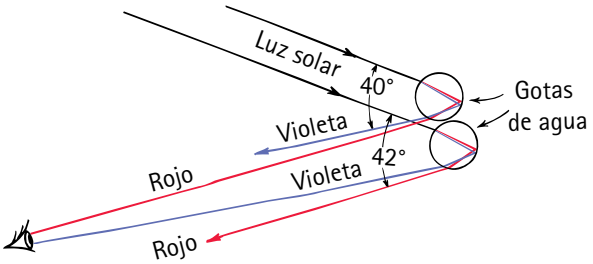



**FIGURA 28.32**
La luz solar incidente sobre dos gotas de lluvia de muestra, como se ilustra, sale de ellas como luz dispersada. El observador ve la luz roja desde la gota superior y la luz violeta desde la gota inferior. Millones de gotas producen todo el espectro de luz visible.

VIDEO: El arcoíris

¿Por qué la luz dispersada por las gotas de lluvia forma un arco? Para responder esto hay que apoyarse en un poco de razonamiento geométrico. Antes que nada, un arcoíris no es el arco bidimensional plano que parece ser. Se ve plano por la misma razón por la que una explosión esférica de fuegos artificiales en el cielo parece un disco: por la ausencia de señales de distancia. El arcoíris que ves en realidad es un cono tridimensional con la punta (ápice) en tu ojo (Figura 28.33). Piensa en un cono de vidrio, la forma de los conos de papel que en ocasiones ves en los bebederos. Si sostuvieras la punta de tal cono de vidrio contra tu ojo, ¿qué verías? Verías el vidrio como un círculo. Lo mismo sucede con un arcoíris. Todas las gotas que dispersan la luz del arcoíris hacia *ti* se encuentran en la forma de un cono, un cono de diferentes capas con gotas que dispersan el rojo hacia tu ojo en el exterior, el anaranjado abajo del rojo, el amarillo abajo del anaranjado y así sucesivamente hasta el violeta en la superficie cónica interior. Mientras más gruesa sea la región que contenga las gotas de agua, más grueso será el borde cónico a través del cual mires, y más vívido será el arcoíris.

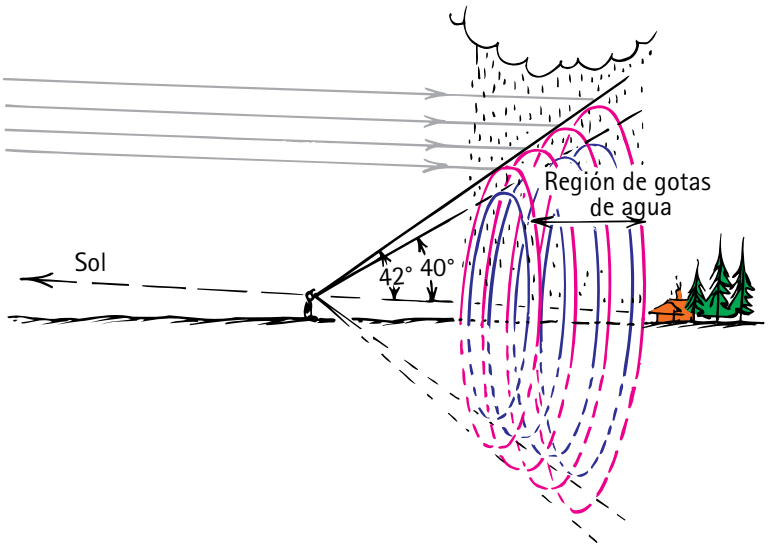



**FIGURA 28.33**
Cuando tu ojo se ubica entre el Sol (no mostrado, afuera hacia la izquierda) y una región con gotas de agua, el arcoíris que ves es el borde de un cono tridimensional que se extiende por la región con gotas de agua. (Innumerables capas de gotas forman innumerables arcos bidimensionales como los cuatro aquí sugeridos.)

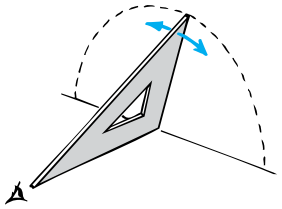


**FIGURA 28.34**
Sólo las gotas de lluvia a lo largo de la línea discontinua dispersan la luz roja hacia el observador a un ángulo de 42°; por tanto, la luz forma un arco.

Para entender esto todavía mejor, considera sólo la desviación de la luz roja. Ves el rojo cuando el ángulo entre los rayos incidentes de luz solar y los rayos dispersados es de 42°. Desde luego, los haces se dispersan 42° de las gotas en todas direcciones por todo el cielo: arriba, abajo y a los lados. Pero la única luz roja que *tú* ves es la proveniente de las gotas que se encuentran en un cono con un ángulo de 42° entre lado y eje. Tu ojo está en el ápice de este cono, como se muestra en la Figura 28.34. Para ver violeta, miras 40° respecto del eje cónico (de modo que el grosor del vidrio del cono del párrafo anterior está ahusado —muy delgado en la punta y más grueso a mayor distancia de la punta—). Tu cono de visión que interseca la nube de gotas que crea tu arcoíris es diferente del de la persona que está junto a ti. De modo que cuando algún amigo te diga "mira qué hermoso arcoíris", tú puedes replicar: "muy bien; hazte a un lado para que pueda verlo". Todo mundo ve su propio arcoíris personal.

Otro hecho acerca de los arcoíris: un arcoíris siempre da hacia ti de frente debido a la falta de señales de distancia mencionada líneas arriba. Cuando te mueves, tu arcoíris se mueve contigo. De modo que nunca te puedes acercar al lado de un arcoíris, o verlo casi desde su final como en la visión exagerada de la Figura 28.33. *No puedes* llegar a su fin. Por tanto, la expresión "buscar la olla de oro al final del arcoíris" significa buscar algo que nunca podrás alcanzar.

Con frecuencia puedes ver un arco secundario más grande, con colores invertidos, que se arquea en un ángulo más grande alrededor del arco primario. No se abordará este arco secundario, excepto para decir que se forma por circunstancias similares y es resultado de una doble reflexión dentro de las gotas de lluvia (Figura 28.36). Debido a esta reflexión adicional (y a la pérdida de refracción adicional), el arco secundario es mucho más tenue y sus colores están invertidos.

**FIGURA 28.35**
Dos refracciones y una reflexión en las gotas de agua producen luz en todos los ángulos hasta aproximadamente 42°, con la intensidad concentrada donde se ve el arcoíris de 40 a 42°. No sale luz de la gota de agua a ángulos mayores que 42°, a menos que experimente dos o más reflexiones dentro de la gota. De modo que el cielo es más brillante dentro del arcoíris que afuera de él. Observa el débil arcoíris secundario a la derecha del primario.

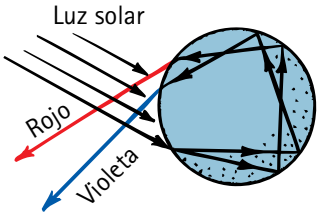



**FIGURA 28.36**
Una doble reflexión en una gota produce un arco secundario.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Si apuntas a una pared con el brazo extendido para formar un ángulo aproximado de 42° con la normal a la pared y luego giras el brazo en un círculo completo al tiempo que mantienes el mismo ángulo, ¿qué forma describe tu brazo? ¿Qué forma recorre tu dedo sobre la pared?**
2. **Si la luz viajara con la misma rapidez en las gotas de lluvia que en el aire, ¿todavía habría arcoíris?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Tu brazo describe un cono y tu dedo recorre un círculo; lo mismo sucede con un arcoíris.
2. No.

## 28.6 Reflexión total interna

Alguna noche de sábado cuando tomes un baño, llena la tina con mucha agua y sumérgete junto con una linterna a prueba de agua. Apaga la luz del baño. Con la luz sumergida, alumbra en línea recta hacia arriba y luego inclínala en forma lenta alejándola de la superficie. Observa cómo la intensidad del haz saliente disminuye y cuánta más luz se refleja de la superficie del agua hacia el fondo de la tina. A un determinado ángulo, llamado *ángulo crítico*, observarás que el haz ya no sale al aire sobre la superficie. La intensidad del haz saliente se reduce a cero en el lugar en el que tiende a rozar la superficie. El **ángulo crítico** es el ángulo mínimo de incidencia en el interior de un medio en el que un rayo de luz se refleja en su totalidad. Cuando la linterna se inclina más

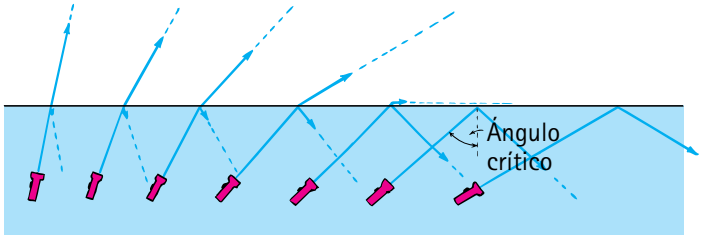



**FIGURA 28.37**
La luz emitida en el agua se refracta parcialmente y se refleja parcialmente en la superficie. Las líneas discontinuas azules muestran la dirección de la luz y las longitudes de las flechas indican las proporciones refractada y reflejada. Más allá del ángulo crítico, el haz se refleja de manera interna en su totalidad.

allá del ángulo crítico (48° con respecto a la normal para el agua), observarás que toda la luz se refleja de vuelta a la tina. Esto es **reflexión total interna**. La luz que golpea la superficie entre el aire y el agua obedece la ley de reflexión: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. La única luz que sale de la superficie del agua es la luz que se refleja de manera difusa desde el fondo de la tina. Este procedimiento se muestra en la Figura 28.37. Las proporciones de luz refractada y de luz reflejada internamente se indican con las longitudes relativas de las flechas.

La reflexión total interna ocurre en los materiales en los cuales la rapidez de la luz es menor que la rapidez de la luz exterior. La rapidez de la luz es menor en agua que en aire, de modo que todos los rayos de luz en el agua que llegan a la superficie con un ángulo de incidencia mayor a 48° se reflejan de vuelta hacia el agua. Así que cuando tu pez dorado en su pecera mira hacia arriba, lo que ve es una vista reflejada de los lados y el fondo de la pecera. Directamente arriba, ve una vista comprimida del mundo exterior (Figura 28.38). La vista exterior de 180° de horizonte a horizonte opuesto se ve a través de un ángulo de 96°: el doble del ángulo crítico. Hay una lente que comprime de manera similar una visión ancha, denominada *lente ojo de pescado*, que se utiliza para fotografía con efecto especial.

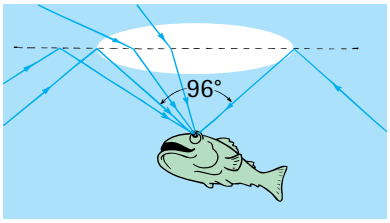



**FIGURA 28.38**
Un observador submarino ve un círculo de luz en la superficie quieta. Más allá de un cono de 96° (el doble del ángulo crítico), un observador ve un reflejo del agua interior o del fondo.

La reflexión total interna ocurre en vidrio rodeado de aire porque la rapidez de la luz en el vidrio es menor que en el aire. El ángulo crítico para el vidrio es de más o menos 43°, según el tipo de vidrio. De modo que la luz en el vidrio que incide con ángulos mayores a 43° respecto de la superficie se refleja por completo internamente. Ninguna luz escapa más allá de este ángulo; más bien, toda se refleja de vuelta al vidrio, incluso cuando la superficie exterior está estropeada por suciedad o polvo, de ahí la utilidad de los prismas de vidrio (Figura 28.39). Un poco de luz se pierde por reflexión antes de entrar al prisma, pero una vez que la luz está adentro, la reflexión en la cara inclinada a 45° es total: 100%. Por el contrario, los espejos plateados o aluminizados reflejan sólo alrededor de 90% de la luz incidente. Por eso se utilizan prismas en lugar de espejos en muchos instrumentos ópticos.

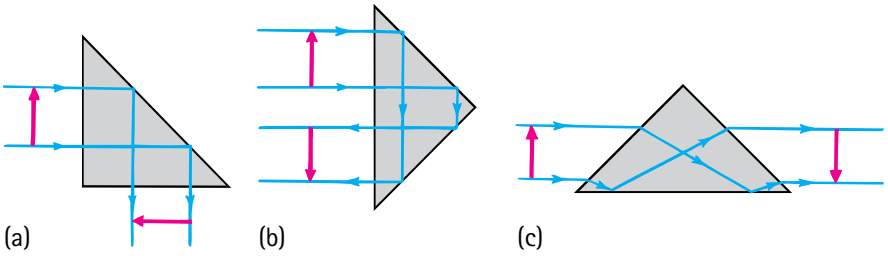



**FIGURA 28.39**
Reflexión total interna en un prisma. El prisma cambia la dirección del haz de luz (a) en 90°, (b) en 180° y (c) nada en absoluto. Observa que, en cada caso, la orientación de la imagen es diferente de la orientación del objeto.

¿Te gustaría volverte rico? Sé el primero en inventar una superficie que refleje 100% de la luz externa que incide sobre ella.

En la Figura 28.40 se muestra un par de prismas, cada uno de los cuales refleja luz a 180°. Los binoculares utilizan pares de prismas para prolongar la trayectoria de la luz entre las lentes y, por ende, eliminan la necesidad de grandes barriles. De modo que un conjunto compacto de binoculares es tan efectivo como un telescopio más largo. Otra ventaja de los prismas es que, mientras que la imagen en un telescopio recto está de cabeza, la reflexión por los prismas en los binoculares revierte la imagen, de modo que las cosas se ven derechas.

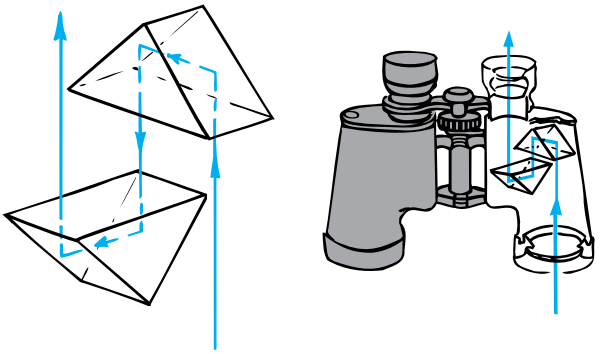


**FIGURA 28.40**
Reflexión total interna en un par de prismas, común en los binoculares.

El ángulo crítico de un diamante es de unos 24.5°, más pequeño que el de cualquier otra sustancia común. El ángulo crítico varía un poco con los colores, porque la rapidez de la luz varía ligeramente con los diferentes colores. Una vez que la luz entra en un diamante, la mayor parte incide sobre los lados inclinados con ángulos mayores que 24.5° y se refleja internamente en su totalidad (Figura 28.41). Debido a la gran reducción de rapidez cuando la luz entra en el diamante, la refracción es pronunciada y, ya que la frecuencia depende de la rapidez, existe una gran dispersión. Hay mayor dispersión cuando la luz sale a través de las muchas facetas en su superficie. En consecuencia, se ven destellos inesperados de una amplia gama de colores. Es interesante que cuando estos destellos son tan angostos que sólo pueden verse con un ojo a la vez, el diamante "destella".

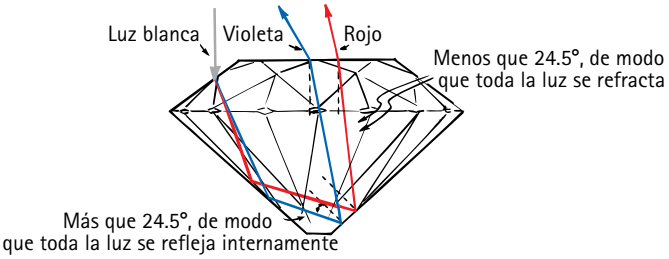



**FIGURA 28.41**
Trayectorias de luz en un diamante. Los rayos que golpean la superficie interior con ángulos mayores que el ángulo crítico se reflejan internamente y salen mediante refracción en la superficie superior.

La reflexión total interna también sirve de base para el funcionamiento de las fibras ópticas o tuberías de luz (Figura 28.42). Una fibra óptica "canaliza" la luz de un lugar a otro mediante una serie de reflexiones totales internas, de forma muy parecida a como una bala rebota en una tubería de acero. Los rayos de luz rebotan a lo largo de las paredes interiores y siguen los giros y vueltas de la fibra. Los haces de fibras ópticas permiten ver lo que ocurre en lugares inaccesibles, como el interior de un motor o el estómago de un paciente. Las fibras pueden fabricarse tan pequeñas que puedan serpentear por los vasos sanguíneos o por los conductos estrechos del cuerpo, como la uretra. La luz alumbra por algunas de las fibras para iluminar la escena y se refleja de vuelta a lo largo de otras.

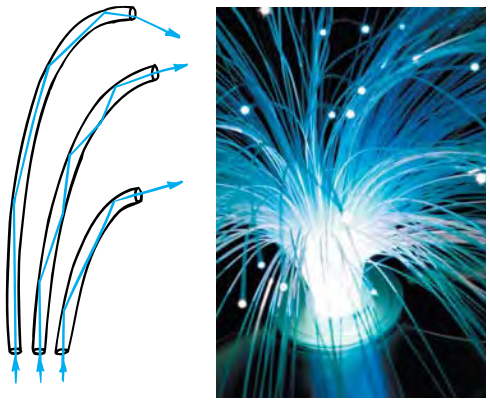


**FIGURA 28.42**
La luz se "canaliza" desde abajo mediante una sucesión de reflexiones totales internas hasta que sale en los extremos superiores.

Los cables de fibra óptica también son importantes en las comunicaciones porque ofrecen una alternativa práctica a los alambres y los cables de cobre. Delgadas fibras de vidrio ahora sustituyen a los gruesos, voluminosos y costosos cables de cobre para transportar miles de mensajes telefónicos simultáneos entre los grandes centros de conmutación y a través del lecho marino. Por medio de las fibras ópticas, las señales de control se alimentan en las aeronaves desde el piloto hasta las superficies de control. Las señales se transportan en las modulaciones de luz láser. A diferencia de la electricidad, la luz es indiferente a la temperatura y a las fluctuaciones en los campos magnéticos circundantes y, por tanto, la señal es más clara. Además, es mucho menos probable que sean intervenidas por espías.

## 28.7 Lentes

Un caso muy práctico de refracción ocurre en las lentes. Para entender una lente puedes analizar las trayectorias que tardan el mismo tiempo, como se hizo antes, o puedes suponer que una lente consiste en varios prismas y bloques de vidrio coincidentes distribuidos en el orden que se muestra en la Figura 28.43. Los prismas y los bloques refractan los rayos de luz paralelos entrantes de modo que convergen hacia (o divergen desde) un punto. El arreglo que se muestra en la Figura 28.43a hace converger la luz, y a tal lente se le llama **lente convergente**. Observa que es más gruesa en el medio y más delgada en los bordes.

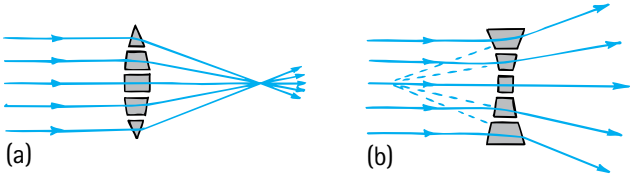



**FIGURA 28.43**
Puede considerarse que una lente es como un conjunto de bloques y prismas: (a) una lente convergente y (b) una lente divergente.

Aprender sobre lentes es una actividad práctica. No jugar con lentes mientras las estudias es como aprender a nadar lejos del agua.

El arreglo de la Figura 28.43b es diferente. La parte media es más delgada que los bordes, y hace divergir la luz; a tal lente se le llama **lente divergente**. Observa que los prismas divergen los rayos incidentes de un modo tal que parece que provienen de un solo punto enfrente de la lente. En ambos lentes, la mayor desviación de los rayos ocurre en los prismas más externos, porque tienen el ángulo más grande entre las dos superficies que refractan. No ocurre desviación exactamente a la mitad, porque en dicha región las caras del vidrio son paralelas entre sí. Desde luego, las lentes reales no están hechas de prismas, como se indica en la Figura 28.43; están hechas de un pedazo sólido de vidrio con una superficie a la que usualmente se le da la forma de una curva esférica. En la Figura 28.44 se observa cómo las lentes lisas refractan ondas.

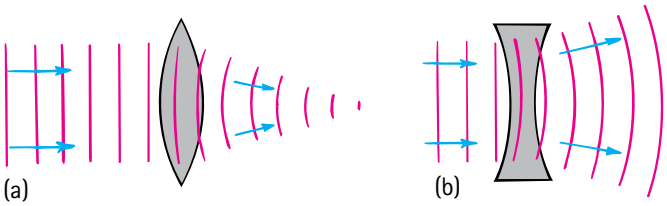



**FIGURA 28.44**
Los frentes de onda viajan con más lentitud en el vidrio que en el aire. (a) Las ondas se retrasan más cuando atraviesan el centro de la lente y resulta una convergencia. (b) Las ondas se retrasan más en los bordes y resulta una divergencia.

En la Figura 28.45 se muestran algunas características fundamentales de la descripción de una lente convergente. El *eje principal* de una lente es la línea que une los centros de curvatura de sus superficies. El *punto focal* (o foco) es el punto donde converge un haz de luz paralelo al eje principal. Los haces paralelos incidentes que no son paralelos al eje principal se enfocan en puntos arriba o abajo del punto focal. Todos esos puntos posibles constituyen un *plano focal*. Una lente tiene dos puntos focales y dos planos focales. Cuando la lente de una cámara se monta para objetos distantes, la superficie fotosensible está muy próxima al plano focal detrás de la lente de la cámara. La *longitud focal* de la lente es la distancia entre el centro de la lente y cualquier punto focal.

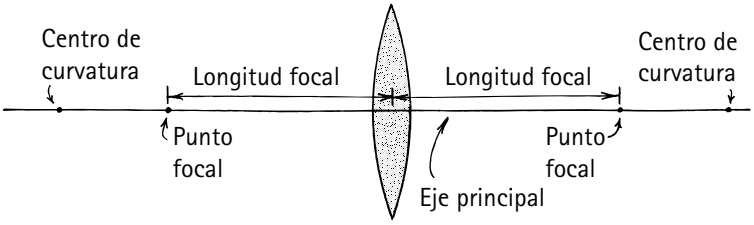



**FIGURA 28.45**
Características fundamentales de una lente convergente.

**FIGURA 28.46**
Los patrones movedizos de las áreas brillantes y oscuras del fondo de la alberca son resultado de la superficie dispareja del agua, que se comporta como una frazada de lentes ondulantes. Así como ves el fondo de la alberca reluciente, un pez que mirara al Sol lo vería reluciente también. Debido a irregularidades similares en la atmósfera, ves centellear a las estrellas.

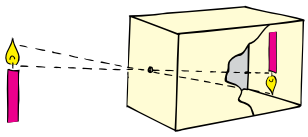
## Formación de imágenes por una lente

En este momento, la luz se está reflejando de tu cara a esta página. La luz que se refleja de tu frente, por ejemplo, golpea cada parte de la página. Lo mismo ocurre con la luz que se refleja de tu barbilla. Cada parte de la página se ilumina con la luz reflejada de tu frente, tu nariz, tu barbilla y cualquier otra parte de tu cara. No ves una imagen de tu cara sobre la página porque hay mucho traslape de luz. Pero coloca una barrera, con una pequeña perforación en ella, entre tu cara y la página, y la luz que llega a la página desde tu frente no se traslapa con la luz de tu barbilla. Lo mismo ocurre con el

SCREENCAST: Imágenes a través de orificios

## PRACTICANDO LA FÍSICA

Construye una cámara estenopeica. Recorta el extremo de una caja de cartón pequeña y cúbrelo con papel de calcar semitransparente o con un pañuelo desechable. Haz un agujerito muy bien recortado en el otro extremo. (Si el cartón es grueso, puedes hacer el agujerito a través de una hoja de papel de aluminio colocada sobre una abertura más grande en el cartón.) Dirige la cámara a un objeto brillante en una habitación oscura y verás una imagen de cabeza sobre el papel de calcar. Cuanto más pequeño sea el orificio, más tenue y definida será la imagen. Si estás en una habitación oscura, sustituye el papel de calcar con película fotográfica no revelada, cubre la parte trasera de modo que sea hermética a la luz y cubre el orificio con una tapa removible. Estás listo para tomar una fotografía. Los tiempos de exposición difieren básicamente con el tipo de película y la cantidad de luz. Prueba con diferentes tiempos de exposición, a partir de unos 3 segundos. Prueba también con cajas de varias longitudes.



En lugar de ver una vela, como sugiere el dibujo, apunta tu caja al cielo, hacia el Sol. La imagen solar sobre el papel de calcar es clara y brillante. Las imágenes del Sol a través del orificio también son evidentes en el suelo debajo de un árbol en un día soleado. Cuando las aberturas que se forman entre las hojas del árbol son pequeñas comparadas con la altura del árbol, las aberturas se comportan como agujeritos y proyectan círculos de luz, muchos traslapados, sobre el suelo. Recuerda las fotografías con las que inician los Capítulos 1 y 27 que muestran lo que ocurre al momento de un eclipse parcial de Sol.

resto de tu cara. Sin este traslape, se forma una imagen de tu cara sobre la página. Será muy tenue porque muy poca de la luz reflejada de tu cara pasa por el orificio. Para ver la imagen, tendrías que blindar la página de otras fuentes de luz. Lo mismo sucede con el jarrón y las flores de la Figura 28.47b.[3]

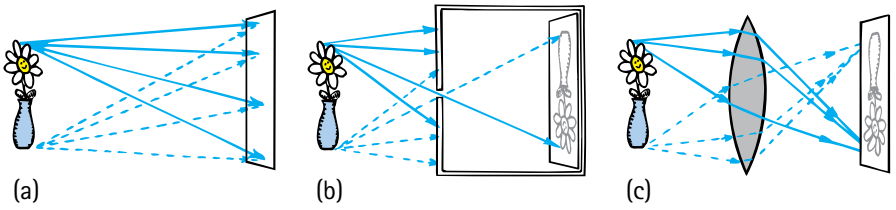



**FIGURA 28.47**
Formación de imágenes. (a) No aparece ninguna imagen sobre la pared porque los rayos provenientes de todas partes del objeto se traslapan por toda la pared. (b) Una sola abertura pequeña en una barrera impide que los rayos traslapados lleguen a la pared; se forma una imagen tenue de cabeza. (c) Una lente converge los rayos sobre la pared sin traslaparlos; más luz forma una imagen más brillante.

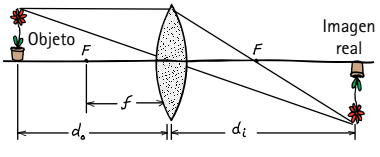
Las primeras cámaras no tenían lentes y dejaban entrar luz por un pequeño orificio. Puedes ver por qué la imagen está de cabeza por los rayos de muestra de la Figura 28.47b. Se necesitaban tiempos de exposición prolongados debido a la pequeña cantidad de luz que entraba por el orificio. Un orificio un poco más grande admitiría más luz, pero los rayos traslapados producirían una imagen borrosa. Un orificio muy grande permitiría mucho traslape y ninguna imagen sería perceptible. Aquí es donde entra en acción una lente convergente (Figura 28.47c). La lente hace que la luz converja sobre la pantalla sin el traslape indeseable de los rayos. Mientras que las primeras cámaras estenopeicas servían sólo para fotografiar objetos en reposo debido al prolongado tiempo de exposición que se necesitaba, los objetos en movimiento pueden fotografiarse con las cámaras de lentes debido al tiempo de exposición corto, razón por la cual las fotografías tomadas con las cámaras con lentes reciben el nombre de *instantáneas*.

¿Puedes ver por qué la imagen de la Figura 28.47b está de cabeza? Y, ¿es cierto que, cuando tus fotografías se procesan e imprimen, todas están de cabeza?

[3]Una forma cuantitativa de relacionar las distancias del objeto con las distancias de la imagen está dada por la ecuación de las lentes delgadas:

$$\frac{1}{d_o}+\frac{1}{d_i}=\frac{1}{f} \quad \text{o} \quad d_i=\frac{d_o f}{d_o-f}$$

donde $d_o$ es la distancia del objeto a la lente, $d_i$ es la distancia de la lente a la imagen y $f$ es la distancia focal de la lente.



SCREENCAST: Lentes

El uso más sencillo de una lente convergente es una lupa. Para entender cómo funciona, piensa en cómo examinas los objetos cercanos y lejanos. A simple vista, un objeto lejano se ve a través de un ángulo de visión relativamente estrecho, y un objeto cercano se ve a través de un ángulo de visión más ancho (Figura 28.48). Para ver los detalles de un objeto pequeño, necesitas acercarte lo más posible para tener el ángulo de visión más ancho. Pero tu ojo no puede enfocar cuando está muy cerca. Ahí es donde entra en acción la lupa. Cuando estás cerca del objeto, la lupa te proporciona una imagen nítida agrandada.

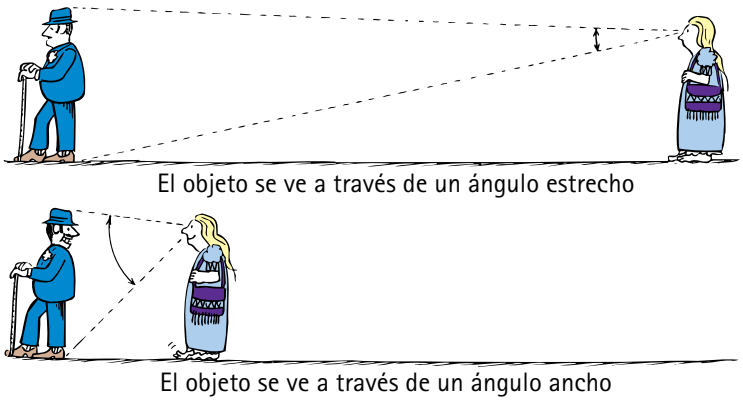



**FIGURA 28.48**
Visualización.

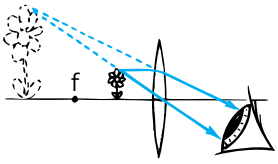



**FIGURA 28.49**
Cuando un objeto está cerca de una lente convergente (antes de su punto focal *f*), la lente actúa como una lupa y produce una imagen virtual. La imagen aparece más grande y más alejada de la lente que el objeto.

Cuando utilizas una lupa, como lo hace Chris Lee en la página 485, la sostienes cerca del objeto que vas a examinar. Esto es así porque una lente convergente ofrece una imagen agrandada derecha sólo cuando el objeto está antes del punto focal (Figura 28.49). Si una pantalla se coloca a la distancia en la que se produce la imagen, no aparece una imagen sobre ella porque no se dirige luz hacia el lugar de la imagen. Sin embargo, los rayos que llegan a tu ojo se comportan *como si* provinieran del lugar de la imagen; al resultado se le denomina **imagen virtual.**

Cuando el objeto está tan lejos que queda fuera del punto focal de una lente convergente, se forma una **imagen real** en lugar de una imagen virtual. La Figura 28.50 muestra un caso en el que una lente convergente forma una imagen real sobre una pantalla. Una imagen real está de cabeza. Se utiliza un arreglo similar para proyectar diapositivas y películas sobre una pantalla y para proyectar una imagen real sobre el área fotosensible de una cámara. Las imágenes reales con una sola lente siempre están de cabeza.

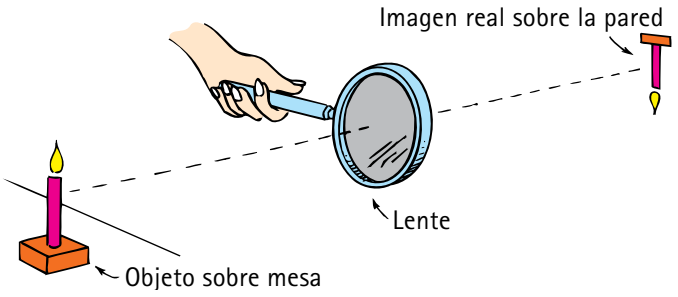



**FIGURA 28.50**
Cuando un objeto está lejos de una lente convergente (fuera de su punto focal), se forma una imagen real de cabeza.

**FIGURA 28.51**
Una lente divergente forma una imagen virtual derecha de Jamie y su gato.

Una lente divergente que se utiliza sola produce una imagen virtual reducida. No importa lo lejos o cerca que esté el objeto. Cuando una lente divergente se usa sola, la imagen siempre es virtual, está derecha y es más pequeña que el objeto. Con frecuencia se usa una lente divergente como "buscador" (visor) en una cámara. Cuando observas el objeto que se va a fotografiar a través de dicha lente, ves una imagen virtual que tiene aproximadamente las mismas proporciones que la fotografía.

## 28.8 Defectos en las lentes

Ninguna lente proporciona una imagen perfecta. La distorsión de la imagen se llama **aberración**. Cuando se combinan lentes de determinadas maneras, las aberraciones pueden disminuirse al mínimo. Por esta razón, la mayor parte de los instrumentos ópticos utiliza lentes compuestas, y cada una consiste en muchas lentes simples en lugar de una sola lente.

La *aberración esférica* resulta de la luz que pasa por los bordes de una lente y se enfocan en un lugar un poco diferente de donde se enfoca la luz que pasa cerca del centro de la lente (Figura 28.52). Para remediar esto, se cubren los bordes de la lente, como con el diafragma de una cámara. La aberración esférica se corrige en los buenos instrumentos ópticos mediante una combinación de lentes.

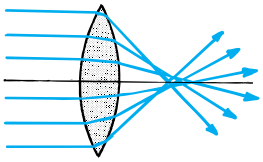


**FIGURA 28.52**
Aberración esférica.

**FIGURA 28.53**
¿Cómo se afecta la visión cuando la visión de ambos ojos se desvía a los lados con prismas? Después de unos minutos, ¡los ojos, el cerebro y los músculos se adaptan al cambio!

La *aberración cromática* es resultado de luz de diferentes colores que tienen distintas rapideces y, por tanto, diferentes refracciones en las lentes (Figura 28.54). En una lente simple (como en un prisma), los diferentes colores de la luz no se llegan a enfocar en el mismo lugar. Las lentes *acromáticas*, que combinan lentes simples de diferentes tipos de vidrio, corrigen este defecto. (Es interesante que Isaac Newton haya sustituido el objetivo de un telescopio con un espejo parabólico para evitar la aberración cromática.)

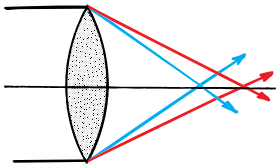


**FIGURA 28.54**
Aberración cromática.

La pupila del ojo cambia de tamaño para regular la cantidad de luz que entra. La visión es más clara cuando la pupila es más pequeña porque la luz pasa entonces sólo por la parte central del cristalino, donde las aberraciones esférica y cromática son mínimas. Además, el ojo, entonces, actúa más como una cámara estenopeica, de modo que se necesita menos enfoque para producir una imagen clara. Ves mejor en la luz brillante porque en dicha luz tus pupilas son más pequeñas.

El *astigmatismo* del ojo es un defecto que resulta cuando la córnea se curva más en una dirección que en otra, un poco como el costado de un barril. Debido a este defecto, el ojo no forma imágenes claras. El remedio son las gafas con lentes cilíndricas que tienen más curvatura en una dirección que en otra.

En la actualidad, una opción para quienes tienen mala vista es usar gafas. La llegada de las gafas probablemente ocurrió en China y en Italia a finales del siglo XIII. (Es muy curioso que el telescopio no se inventara sino unos 300 años después. Si, mientras tanto, alguien veía objetos a través de un par de lentes separadas a lo largo de sus ejes, como lentes fijas en los extremos de un tubo, no hay registro de ello.) Una alternativa a las gafas son las lentes de contacto. Una alternativa más es la LASIK (acrónimo en inglés para queratomileusis *in situ* asistida por láser), en la que pulsos de luz láser vuelven a dar forma a la córnea y producen una visión normal. Otro procedimiento, la PRK (acrónimo en inglés para queratectomía fotorrefractiva), corrige los tres defectos comunes de la vista. IntraLase, lentes de contacto que se implantan, así como procedimientos más novedosos, siguen en desarrollo. Es seguro afirmar que usar gafas y lentes de contacto pronto será cosa del pasado. Realmente vives en un mundo que cambia con rapidez. Y eso puede ser bueno.

**pti**

- Ahora hay gafas baratas con lentes llenos de agua. Agregar o quitar el agua entre dos membranas de policarbonato puede corregir tanto la miopía como la hipermetropía. Una bomba pequeña regula la cantidad de agua entre las membranas. El agua puede producir una lente convexa para la hipermetropía, o menos agua puede producir una lente cóncava para la miopía. Una vez que se optimiza cada lente, el usuario fija en su lugar la configuración establecida del agua. La bomba y el ensamble de tubos se quitan y quedan intactos para ajustes posteriores. Consulta en internet *Self-Adjusting Eyeglasses for the World's Poor* (Gafas autoajustables para los pobres del mundo).

Si usas gafas y alguna vez te las has colocado mal, o si se te dificulta leer letras pequeñas, intenta entrecerrar los ojos o, todavía mejor, intenta sostener un agujerito (en una hoja de papel o cualquier cosa) enfrente de tu ojo, cerca de la página. Verás la letra pequeña con claridad y, dado que estás cerca de ella, la verás amplificada. ¡Inténtalo y verás!

### PUNTO DE CONTROL

1. **Si la luz viajara con la misma rapidez en el vidrio y en el aire, ¿las lentes de vidrio alterarían la dirección de los rayos de luz?**
2. **¿Por qué existe aberración cromática en la luz que pasa a través de una lente, pero ninguna en la luz que se refleja de un espejo?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. No.
2. Diferentes frecuencias viajan con distintas rapideces en un medio transparente y, por tanto, se refractan con diferentes ángulos, lo que produce aberración cromática. Sin embargo, los ángulos a los que se refleja la luz no tienen nada que ver con su frecuencia. Un color se refleja igual que cualquier otro color. Por tanto, en los telescopios, los espejos son preferibles a las lentes, porque no hay aberración cromática.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Reflexión.** El regreso de los rayos de luz desde una superficie.

**Principio del tiempo mínimo de Fermat.** La luz toma la trayectoria que necesita el tiempo mínimo cuando va de un lugar a otro.

**Ley de reflexión.** El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

**Refracción.** El doblado de un rayo de luz oblicuo cuando pasa de un medio transparente a otro.

**Ángulo crítico.** El ángulo mínimo de incidencia dentro de un medio al cual un rayo de luz se refleja en su totalidad.

**Reflexión total interna.** La reflexión total de la luz que viaja dentro de un medio más denso cuando golpea la frontera con un medio menos denso a un ángulo más grande que el ángulo crítico.

**Lente convergente.** Lente que es más gruesa en medio que en los bordes y que refracta rayos paralelos hacia un foco.

**Lente divergente.** Lente que es más delgada en medio que en los bordes, lo que hace que los rayos paralelos diverjan.

**Imagen virtual.** Imagen formada por rayos de luz que no convergen en el lugar de la imagen.

**Imagen real.** Imagen formada por rayos de luz que convergen en el lugar de la imagen. Una imagen real, a diferencia de una imagen virtual, puede desplegarse sobre una pantalla.

**Aberración.** Distorsión de una imagen producida por una lente, que en cierto grado está presente en todos los sistemas ópticos.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 28.1 Reflexión

1. ¿Cómo es que la luz incidente que cae sobre un objeto afecta el movimiento de los electrones de los átomos del objeto?
2. ¿Qué hacen los electrones afectados por la iluminación cuando se ponen a vibrar con mayor energía?
3. ¿Qué es el principio del tiempo mínimo de Fermat?

### 28.2 La ley de reflexión

4. Cita la ley de reflexión.
5. En relación con la distancia de un objeto enfrente de un espejo plano, ¿qué tan lejos está la imagen detrás del espejo?
6. ¿Qué fracción de la luz que alumbra recto en un pedazo de vidrio transparente se refleja desde la primera superficie?
7. ¿Una superficie puede considerarse que está pulida para algunas ondas y no para otras? Ofrece un ejemplo.

### 28.3 Refracción

8. ¿Cómo se compara el ángulo al que un rayo de luz golpea un panel de una ventana de vidrio, con el ángulo al que la luz sale del otro lado?
9. ¿Cuándo ocurre que el ángulo al que un rayo de luz golpea un vidrio no es igual que el ángulo al que sale?
10. ¿En cuál medio la luz viaja más rápido: aire delgado o aire denso? ¿Cómo afecta esto el periodo de la luz diurna?
11. ¿La ley de reflexión se sostiene para espejos curvos? Explica.
12. ¿Un espejismo es el resultado de la reflexión o de la refracción?

### 28.4 La causa de la refracción

13. Cuando la rueda de un carro se mueve desde una acera lisa hacia un jardín con césped, la interacción de la rueda con las hojas de césped frena la rueda. ¿Qué frena a la luz cuando pasa del aire al vidrio o al agua?

14. ¿Cuál es el ángulo entre un rayo de luz y su frente de onda?
15. ¿Cuál es la relación entre la refracción y la rapidez de la luz?
16. ¿Las gafas hechas con materiales con "alto índice de refracción" son delgadas o gruesas?
17. ¿La refracción de la luz hace que una alberca parezca más profunda o menos profunda de lo que en realidad es?

### 28.5 La dispersión y los arcoíris

18. ¿Cuál viaja con más lentitud en vidrio: la luz roja o la luz violeta?
19. ¿Una sola gota de lluvia iluminada por la luz solar desvía la luz de un solo color o dispersa un espectro de colores?
20. ¿Un observador ve un solo color o un espectro de colores provenientes de una sola gota lejana?
21. ¿Por qué un arcoíris secundario es más tenue que un arcoíris primario?

### 28.6 Reflexión total interna

22. ¿Qué se entiende por "ángulo crítico"?
23. ¿A qué ángulo dentro del vidrio la luz se refleja internamente en su totalidad? ¿A qué ángulo dentro de un diamante la luz se refleja internamente en su totalidad?
24. La luz suele viajar en líneas rectas, pero se "dobla" en una fibra óptica. Explica.

### 28.7 Lentes

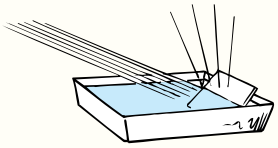
25. Distingue entre una lente convergente y una lente divergente.
26. ¿Qué es la distancia focal de una lente?
27. Distingue entre una imagen virtual y una imagen real.
28. ¿Qué tipo de lente puede usarse para producir una imagen real? ¿Una imagen virtual?

### 28.8 Defectos en las lentes

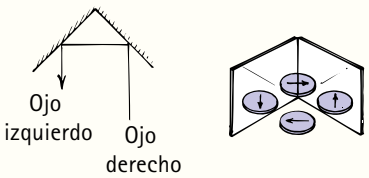
29. ¿Por qué la visión es más clara cuando las pupilas del ojo están muy pequeñas?
30. ¿Qué es el astigmatismo y cómo puede corregirse?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

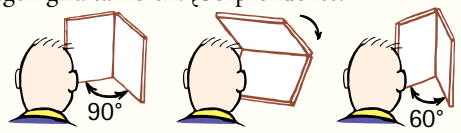
31. Envía un mensaje a la abuela y convéncela de que, para ver su imagen completa en el espejo, el espejo sólo debe tener la mitad de su altura. Discute también el intrigante papel de la distancia en un espejo que tenga la mitad de tamaño. Tal vez sea útil hacer dibujos sencillos que acompañen tus explicaciones.
32. Puedes producir un espectro si colocas una bandeja de agua en la luz solar brillante. Inclina un espejo de bolsillo contra el borde interior de la bandeja y ajústalo hasta que aparezca el espectro en la pared o el techo. ¡Ajá! Produjiste un espectro sin un prisma.



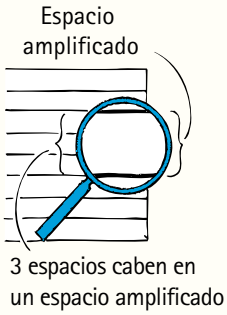
33. Coloca dos espejos de bolsillo en ángulo recto y pon una moneda entre ellos. Verás cuatro monedas. Cambia el ángulo de los espejos y observa cuántas imágenes de la moneda puedes ver. Con los espejos en ángulo recto, mira tu cara. Luego parpadea. ¿Ves algo extraño? Sostén una página impresa contra los espejos dobles y compara su apariencia con la reflexión de un solo espejo.




34. Obsérvate en un par de espejos colocados en ángulo recto. Te ves como los demás te ven. Gira los espejos, todavía en ángulo recto. ¿Tu imagen también gira? Ahora coloca los espejos separados 60° de modo que de nuevo veas tu cara. Gira otra vez los espejos y observa si tu imagen gira también. ¿Sorprendente?




35. Determina el poder amplificador de una lente al enfocar sobre las líneas de una hoja de papel rayada. Cuenta los espacios entre las líneas que caben en un espacio amplificado y tendrás el poder amplificador de la lente. Puedes hacer lo mismo con los binoculares y una pared de ladrillo distante. Sostén los binoculares de modo que sólo un ojo mire los ladrillos a través del ocular mientras el otro ojo mira directamente los ladrillos. El número de ladrillos vistos con el ojo sin ayuda que caben en un ladrillo amplificado te proporciona la amplificación del instrumento.



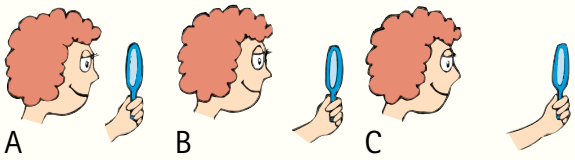

36. Perfora un orificio en una hoja de papel, sostenla en la luz solar de modo que la imagen solar sea del mismo tamaño que una moneda en el suelo y luego determina cuántas monedas cabrían entre el suelo y el orificio. Éste es el mismo número de diámetros solares que cabrían en la distancia de la Tierra al Sol. (¿Recuerdas este ejercicio del Capítulo 1?)

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

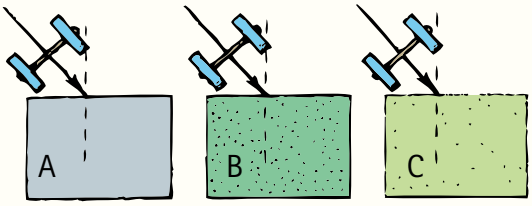
37. Supón que caminas hacia un espejo a 2 m/s. ¿Qué tan rápido se aproximan mutuamente tú y tu imagen? (La respuesta *no* es 2 m/s.)
38. Demuestra con un diagrama simple que, cuando un espejo con un haz fijo incidente sobre él gira un determinado ángulo, el haz reflejado gira un ángulo el doble de grande. (Esta duplicación del desplazamiento hace que sean más evidentes las irregularidades en el vidrio de una ventana ordinaria.)
39. Una mariposa a nivel del ojo está 20 cm enfrente de un espejo plano. Tú estás detrás de la mariposa, a 50 cm del espejo. ¿Cuál es la distancia entre tu ojo y la imagen de la mariposa en el espejo?
40. Cuando luz golpea un vidrio en sentido perpendicular, en cada superficie se refleja alrededor de 4%. Demuestra que 92% de la luz se transmite a través de un panel de vidrio de ventana.
41. Ningún vidrio es perfectamente transparente. Sobre todo debido a las reflexiones, alrededor de 92% de la luz pasa a través de una hoja de vidrio transparente de una ventana. La pérdida de 8% no se aprecia a través de una sola hoja, pero a través de varias hojas la pérdida es evidente. ¿Cuánta luz se transmite por una ventana doble (una con dos hojas de vidrio)?
42. El diámetro del Sol forma un ángulo de 0.53° con la Tierra. ¿Cuántos minutos tarda el Sol en moverse 1 diámetro solar en un cielo directamente sobre tu cabeza? (Recuerda que transcurren 24 horas, o 1,440 minutos, para que el Sol se mueva a través de 360°.) ¿Cómo se compara tu respuesta con el tiempo que tarda el Sol en desaparecer, una vez que su borde inferior toca el horizonte al atardecer? (¿La refracción afecta tu respuesta?)

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

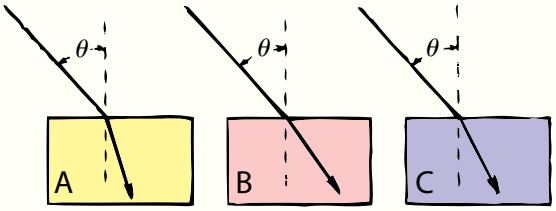
43. Ella mira su rostro en un espejo de mano. Clasifica la cantidad de rostro que ve en las tres posiciones, de mayor a menor (¿o es la misma en todas las posiciones?).



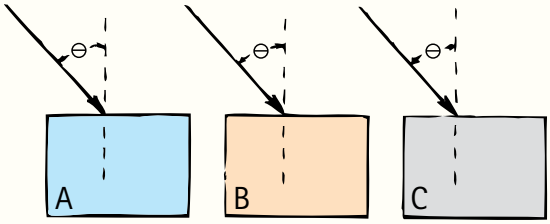

44. Las ruedas de un carro de juguete ruedan desde una acera de concreto hacia las siguientes superficies: A, un camino pavimentado; B, un jardín con césped, y C, césped muy recortado en el *green* de un campo de golf. Debido al frenado, cada conjunto de ruedas se dobla en la frontera y se desvía de su curso inicial en línea recta. Clasifica las superficies de acuerdo con la cantidad que se dobla cada conjunto de ruedas en la frontera, de la mayor cantidad de doblado a la menor.




45. Rayos de luz idénticos entran en tres bloques transparentes compuestos de diferentes materiales. La luz frena al entrar en los bloques. Clasifica los bloques de acuerdo con la rapidez con que viaja la luz en cada caso, de mayor a menor.



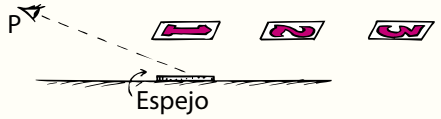

46. Rayos de luz idénticos en aire se refractan al entrar en tres materiales transparentes: A, agua, donde la rapidez de la luz es 0.75*c*; B, alcohol etílico (rapidez 0.7*c*), y C, vidrio *crown* (rapidez 0.6*c*). Clasifica los materiales de acuerdo con cuánto se dobla el rayo de luz hacia la normal, de mayor doblado a menor doblado.




## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

47. Este capítulo abrió con una fotografía del instructor de física Peter Hopkinson que parece flotar sobre la mesa. No lo hace. Explica cómo crea esta ilusión.
48. En la fotografía del pato de pie sobre la roca, al inicio del capítulo, ¿por qué los pies del pato no se muestran en la visión reflejada?
49. En la fotografía del profesor de física Fred Myers tomando una fotografía de su hija McKenzie, al inicio del capítulo, ¿cuántos espejos se utilizaron? Explica.
50. En las imágenes múltiples de la profesora de física Karen Jo Matsler en la fotografía al inicio del capítulo, ¿cuántos espejos se utilizaron?
51. El principio de Fermat es de tiempo, no de distancia mínima. ¿La distancia mínima se aplicaría también para la reflexión? ¿Para la refracción? ¿Por qué tus respuestas son diferentes?

52. Tu ojo en el punto P mira en el espejo. ¿Cuál de las tarjetas numeradas puedes ver reflejada en el espejo?

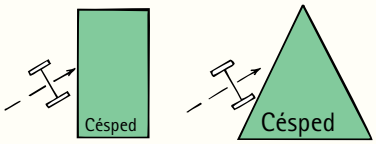



53. El vaquero Joe quiere disparar a su atacante rebotando una bala en una placa metálica reflejante. Para hacer esto, ¿debería apuntar simplemente a la imagen especular de su atacante? Explica.
54. ¿Por qué el letrero en el frente de algunos vehículos "está al revés"?

55. Con frecuencia, los camiones tienen señales en la parte trasera que dicen "si no puedes ver mis espejos, no puedo verte". Explica la física aquí.
56. Cuando te miras en el espejo y saludas con tu mano derecha, tu hermosa imagen saluda con la mano izquierda. Entonces, ¿por qué los pies de tu imagen no se contonean cuando sacudes la cabeza?
57. Los espejos de los automóviles no tienen ningún recubrimiento en la superficie frontal y están plateados en la superficie posterior. Cuando el espejo se ajusta de manera correcta, la luz proveniente de atrás se refleja de la superficie plateada hacia los ojos del conductor. Bien. Pero esto no es tan bueno en la noche con el destello de los faros desde atrás. Este problema se resuelve con la forma de cuña del espejo (véase el dibujo). Cuando el espejo se inclina un poco hacia arriba, hacia la posición "nocturna", el destello se dirige hacia arriba, hacia el techo, lejos de los ojos del conductor. Sin embargo, el conductor todavía puede ver los automóviles detrás suyo en el espejo. Explica.

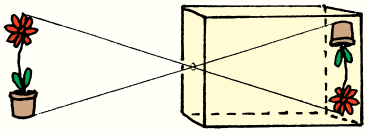
58. Una persona en una habitación oscura que mira por la ventana puede ver con claridad a una persona afuera en la luz de día, en tanto que la persona que está afuera no puede ver a la persona en el interior. Explica.
59. ¿Cuál es la ventaja de tener páginas mate (no brillosas) en este libro en lugar de páginas con una superficie más brillante?
60. ¿Cuál debe ser la longitud mínima de un espejo plano para que puedas ver una imagen completa tuya?
61. ¿Qué efecto tiene tu distancia del espejo plano en tu respuesta al ejercicio anterior? (¡Inténtalo y observa!)
62. Sostén un espejo de bolsillo casi a la distancia de tu brazo desde tu cara y observa cuánto de tu cara puedes ver. Para ver más de tu cara, ¿debes sostener el espejo más cerca o más lejos, o deberías tener un espejo más grande? (¡Inténtalo y observa!)
63. En un espejo empañado, límpialo sólo lo suficiente como para ver tu cara completa. ¿Qué tan alta será el área limpiada, comparada con la dimensión vertical de tu cara?
64. El dibujo muestra a una persona y a su gemela a distancias iguales en lados opuestos de una pared delgada. Supón que se recortará una ventana en la pared de modo que cada gemela pudiera tener una visión completa de la otra. Muestra el tamaño y la ubicación de la ventana más pequeña que puede recortarse en la pared para conseguirlo. (*Sugerencia:* dibuja rayos de la parte superior de la cabeza de cada gemela a los ojos de la otra gemela. Haz lo mismo de los pies de cada una a los ojos de la otra.)

65. Puedes decir si las personas son miopes o hipermétropes si observas el tamaño de sus ojos a través de sus gafas. Cuando los ojos de una persona parecen amplificados, ¿la persona es miope o hipermétrope?
66. Si una persona miope quiere gafas más delgadas, ¿se recomienda un índice de refracción más alto o más bajo para sus gafas?
67. Tu amigo dice que la longitud de onda de las ondas de luz es más corta en el agua que en el aire y cita la Figura 28.25 como evidencia. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo, y por qué?
68. Un par de ruedas de un carro de juguete ruedan de manera oblicua desde una superficie lisa hacia dos terrenos con césped, uno rectangular y otro triangular, como se muestra. El terreno está sobre una ligera pendiente, de modo que, después de frenar en el césped, las ruedas de nuevo adquirirán rapidez cuando salgan




sobre la superficie lisa. Termina cada dibujo y muestra algunas posiciones de las ruedas dentro de los terrenos y en los otros lados, de modo que indiquen la dirección de viaje.
69. Un pulso de luz roja y un pulso de luz azul entran en un bloque de vidrio al mismo tiempo, normales a su superficie. Estrictamente hablando, después de pasar a través del bloque, ¿cuál pulso sale primero?
70. Durante un eclipse lunar, la Luna no está oscura por completo, sino en general de un rojo oscuro. Explica esto en términos de la refracción de todos los atardeceres y amaneceres en el mundo.
71. ¿Qué explican las grandes sombras proyectadas por los extremos de las delgadas patas del insecto sobre el agua?

72. Cuando te paras con la espalda hacia el Sol, ves un arcoíris como un arco circular. ¿Podrías moverte hacia un lado y entonces ver el arcoíris como un segmento de elipse en lugar del segmento de un círculo (como sugiere la Figura 28.33)? Defiende tu respuesta.
73. ¿Por qué los googles permitirán a un nadador bajo el agua enfocar con más claridad lo que observa?
74. Si un pez usara googles arriba de la superficie del agua, ¿por qué la visión del pez sería mejor si los googles estuvieran llenos de agua? Explica.
75. ¿Un diamante bajo el agua destella más o menos que en el aire? Defiende tu respuesta.
76. Cubre la mitad superior de la lente de una cámara. ¿Qué efecto tiene esto sobre las imágenes tomadas?
77. ¿Qué ocurrirá con la imagen proyectada sobre una pantalla por una lente cuando cubres un tercio de la lente con un filtro rojo, un tercio con un filtro verde y un tercio con un filtro azul? (¡Inténtalo y observa!)
78. ¿Cómo podría hacerse una lente convergente para ondas sonoras? (Dicha lente, una bolsa esférica de gas, es una característica del Exploratorium de San Francisco.)
79. ¿Los telescopios refractores y los microscopios amplificarían si la luz tuviera la misma rapidez en vidrio que en aire? Defiende tu respuesta.
80. Existe menos diferencia entre la rapidez de la luz en vidrio y la rapidez de la luz en agua, que la que existe entre la rapidez de la luz en vidrio y la rapidez de la luz en aire. ¿Esto significa que una lupa amplificará más o amplificará menos cuando se use bajo el agua en lugar de en aire?
81. Las ondas no se traslapan en la imagen de una cámara estenopeica. ¿Esta característica contribuye a una imagen clara o a una imagen borrosa?
82. ¿Por qué la claridad de la imagen en una cámara estenopeica no depende de la posición de la pantalla de visualización?



83. Mientras que los orificios proporcionan imágenes definidas, las lentes con grandes aperturas son convenientes para las cámaras espías de los aviones de vuelo alto. ¿Por qué?
84. Si apuntas al Sol la cámara estenopeica de la pregunta 82, en la pantalla de visualización se verá una imagen solar clara y brillante. ¿Cómo se relaciona esto con las manchas circulares de luz que rodean a Lillian bajo el árbol iluminado por el Sol que se muestra en la fotografía?

85. En términos de longitud focal, ¿qué tan lejos detrás de la lente de la cámara se ubica una superficie fotosensible cuando se fotografían objetos muy distantes?
86. ¿Por qué las diapositivas en un antiguo proyector se ponen de cabeza?
87. La imagen producida por una lente convergente está de cabeza. Tus ojos tienen lentes convergentes. ¿Esto significa que las imágenes que ves están de cabeza en tu retina? Explica.
88. Las imágenes producidas por la lente convergente de una cámara están de cabeza. ¿Esto significa que las fotografías tomadas con la cámara están de cabeza?
89. Los mapas de la Luna están de cabeza. ¿Por qué?
90. ¿Por qué los ancianos que no usan gafas leen los libros más alejados de los ojos que los jóvenes?
91. Cuando Stephanie Hewitt sumerge una barra de vidrio en aceite vegetal, la parte sumergida de la barra es invisible. ¿Qué te dice esto acerca de las rapideces relativas de la luz en el vidrio y en el aceite? O, planteado de otra forma: ¿cómo se comparan los índices de refracción, $n$, para el vidrio y el aceite?

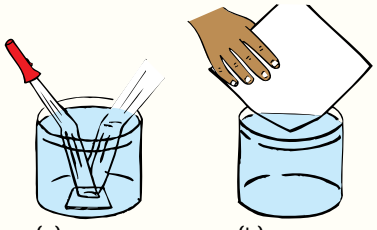
## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

92. Para reducir el brillo de los alrededores, las ventanas de algunas tiendas departamentales, en lugar de ser verticales, se inclinan hacia adentro en la parte de abajo. Discute por qué esto reduce el brillo.
93. ¿Qué tipo de superficie de la carretera es más fácil de ver cuando conduces de noche: una superficie empedrada dispareja o una superficie lisa como un espejo? Discute por qué es difícil ver el camino enfrente de ti cuando conduces en una noche lluviosa.

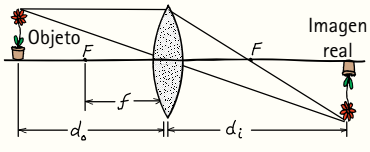
94. ¿Por qué la luz reflejada del Sol o la Luna parece una columna en el cuerpo de agua que se muestra? ¿Cómo se vería la luz reflejada si la superficie del agua fuese perfectamente lisa?

95. ¿Qué es lo que ves exactamente cuando observas un espejismo de "agua sobre el camino"?
96. ¿Qué está mal con la caricatura del hombre que se mira en el espejo? (Pide a un amigo que se ponga frente a un espejo como se muestra y lo verás.)

97. Un haz de luz se dobla como se muestra en (a), mientras que los bordes del cuadrado sumergido se doblan como se muestra en (b). ¿Estas imágenes son contradictorias? Explica.




98. Cuando una linterna sumergida en agua alumbra hacia el aire de arriba, ¿la rapidez de la luz aumenta o disminuye cuando la luz pasa del agua al aire?
99. Si, mientras estás de pie sobre el lecho de un río, quieres arponear un pez bajo la superficie del agua frente a ti, ¿debes apuntar hacia arriba, hacia abajo o directamente al pez observado para hacer un blanco directo? Si, en vez de ello, apuntas al pez con un láser, ¿debes apuntar arriba, abajo o directamente al pez observado? Defiende tu respuesta.
100. Si el pez del ejercicio anterior fuese pequeño y azul y tu láser fuera rojo, ¿qué correcciones deberías hacer? Explica.
101. Cuando un pez en un estanque mira hacia arriba a un ángulo de 45°, ¿ve el cielo arriba de la superficie del agua o un reflejo de la frontera agua-aire del fondo del estanque? Defiende tu respuesta.
102. Los rayos de luz que se mueven hacia arriba a través del agua hacia la frontera agua-aire a ángulos mayores a 48° con respecto a la normal se reflejan en su totalidad. Ningún rayo más grande que 48° se refracta hacia afuera. ¿Y qué hay de lo contrario? ¿Existe un ángulo al cual los rayos de luz en el aire que encuentren la frontera aire-agua se reflejarán en su totalidad? ¿O alguna luz se refractará en todos los ángulos?
103. Si fueras a enviar un haz de luz láser a una estación espacial arriba de la atmósfera, que parezca estar justo arriba del horizonte, ¿apuntarías el láser hacia arriba, hacia abajo o hacia la estación espacial visible? Defiende tu respuesta.
104. Dos observadores apartados uno del otro no ven el "mismo" arcoíris. Explica.
105. Un arcoíris visto desde un avión puede formar un círculo completo. ¿Dónde aparecerá la sombra del avión? Explica.
106. ¿En qué se parece un arcoíris al halo que a veces se ve alrededor de la Luna en una noche helada? Si no tienes la respuesta, busca en Internet y observa cómo difieren los arcoíris y los halos.
107. Las cubiertas plásticas transparentes para albercas, llamadas *hojas de calor solar*, tienen miles de pequeñas burbujas llenas de aire que parecen lentes. Se dice que las burbujas de estas hojas enfocan el calor del Sol hacia el agua, lo que en consecuencia aumenta su temperatura. ¿Crees que estas burbujas dirigen más energía solar hacia el agua? Defiende tu respuesta.
108. ¿La intensidad promedio de la luz solar, medida por un luxómetro en el fondo de la alberca de la Figura 28.46, sería diferente si el agua estuviera quieta?
109. Cuando tu ojo está sumergido en agua, los rayos de luz se doblan sólo un poco cuando pasan del agua a tu córnea. ¿Por qué el doblado no es tan pronunciado como cuando la luz pasa del aire a tu córnea? (¿Cómo difieren los índices de refracción de tu córnea, el aire y el agua?)
110. Cuando tu ojo está sumergido en agua, ¿la rapidez de la luz aumenta, disminuye o permanece constante mientras pasa del agua a tu córnea?
111. En el dibujo que acompaña a la nota 3 a pie de la página 535, que se repite aquí, se muestran dos rayos. Analiza si estos dos rayos producen la imagen o simplemente ubican dónde está la imagen en relación con la lente.



29

CAPÍTULO 29

# Ondas de luz


29.1 Principio de Huygens

29.2 Difracción

29.3 Superposición e interferencia

29.4 Interferencia en películas delgadas

29.5 Polarización

29.6 Holografía

**1** Robert Greenler muestra colores de interferencia con una *gran* pompa de jabón. **2** Esta fotografía es muy estimada por los profesores de física Marshall Ellenstein y Helen Yan, quienes estaban en el estacionamiento del Cal Tech discutiendo los diagramas de Feynman en la camioneta de Feynman cuando Richard Feynman pasó… y accedió a tomarse la fotografía. **3** La neozelandesa Jennie McKelvie muestra el comportamiento ondulatorio con un tanque de ondas. **4** Para introducir a sus alumnos en el estudio de la polarización, Janie Head compara cómo una soga sacudida a través de la rejilla metálica se relaciona con el paso de la luz a través de un Polaroid.

Después de que *Física conceptual* se publicara por primera vez en 1971, me reuní con Marshall Ellenstein en una conferencia de física en Chicago. Él fue uno de los primeros profesores en adoptar el libro que él había intentado escribir. Marshall me invitó a cenar a su casa en Chicago con él y su esposa. También me invitó a sus clases en el bachillerato donde trabajaba. Acepté ambas invitaciones y desde entonces hemos sido grandes amigos.

Marshall, ahora retirado, estaba entre los mejores profesores de física de Chicago. Además de su pasión por enseñar física, es un mago consumado y ganador de premios tanto en jitterbug como en bridge. Como maestro, está convencido de que la física es muy emocionante y relevante para la vida cotidiana como para no formar parte importante de la enseñanza. Puesto que él posee todas las cualidades que constituyen a un gran profesor, sus clases de física rebosaban de alumnos ansiosos por aprender. Un proyecto final en la época cuando lo visité consistía en pedir a cada estudiante que hiciera un libro de recortes con diez fotografías que mostraran la física en la vida diaria. La conclusión, que revelaba ya bien terminado el curso, después de que le enviaban todas las fotografías, era que *cualquier* fotografía mostraba a la física; que la física *estaba en todas partes*. Incluso una fotografía en blanco mostraba la reflexión de cualquier color de luz que incidiera sobre ella. Para los estudiantes de Marshall la física no era algo escondido en los libros o en los anaqueles del laboratorio.

Marshall nunca escribió su libro de física. En vez de ello, me dio ideas continuamente en el transcurso de los años, de ahí los muchos "Gracias a Marshall Ellenstein" en los pies de las páginas del Libro de prácticas y en las Preguntas de seguimiento. Marshall editó videos de mis conferencias en clase, en los primeros años en el City College de San Francisco, y en los últimos años en la University of Hawaii, y digitalizó dichos videos, que ahora están disponibles "a petición" para las personas que usen dispositivos electrónicos como teléfonos inteligentes, iPad o computadoras. Marshall también publicó la serie "Hewitt drew it" (Hewitt lo dibujó) en YouTube. Los videos y los screencast se mencionan a lo largo del libro. Menos visibles son sus muchas ideas dentro de los párrafos del libro y las figuras. En este capítulo, por ejemplo, Marshall sugirió la sección acerca de visualización tridimensional y proporcionó el estereograma generador por computadora de la Figura 29.41. Me exhortó a presentar hologramas y me ayudó a adaptar temas en todo el libro.

Al igual que muchos profesores, Marshall comenzaba la física con el estudio de la luz en lugar de la mecánica; su experiencia le decía que la luz era un mejor gancho para captar el interés inicial del estudiante. Este capítulo comienza como Marshall lo hizo en sus cursos, con la naturaleza ondulatoria de la luz.

## 29.1 Principio de Huygens

Lanza una roca en un estanque de aguas tranquilas y aparecen ondas sobre la superficie del agua. Golpea un diapasón y ondas de sonido se dispersan en todas direcciones. Enciende un fósforo y ondas de luz se expanden por igual en todas direcciones. En 1678, un físico danés, Christian Huygens, estudió el comportamiento ondulatorio y propuso que los frentes de onda de las ondas de luz que se propagan desde una fuente puntual pueden considerarse como las crestas traslapadas de pequeñas ondas secundarias (Figura 29.2): que los frentes de onda están constituidos de frentes de onda más pequeños. A esta idea se le conoce como **principio de Huygens**:

**Todo punto de un frente de onda puede considerarse como la fuente de pequeñas ondas secundarias que se propagan en todas direcciones con una rapidez igual a la rapidez de propagación de las ondas.**

**FIGURA 29.1**
Las ondas de agua forman círculos concéntricos.

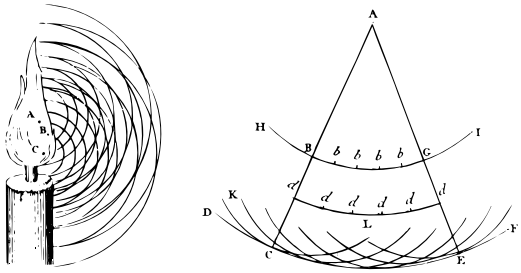



**FIGURA 29.2**
Estos dibujos son del libro de Huygens *Treatise on Light*. (Tratado sobre la luz.) La luz proveniente de A se expande en forma de frentes de onda, cada punto de los cuales se comporta como si fuese una nueva fuente de ondas. Las pequeñas ondas secundarias que parten de *b*, *b*, *b*, *b* forman un nuevo frente de onda (*dddd*); las pequeñas ondas secundarias que parten de *d*, *d*, *d*, *d* forman otros nuevos frentes de onda (DCEF).

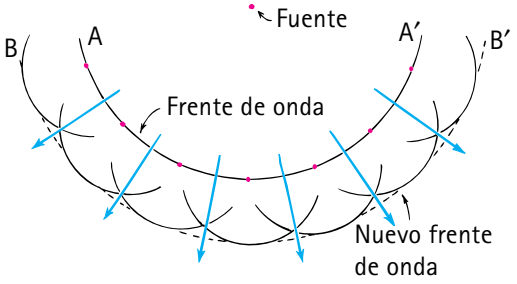



**FIGURA 29.3**
El principio de Huygens aplicado a un frente de onda esférico.

Considera el frente de onda esférico de la Figura 29.3. Puedes ver que, si todos los puntos a lo largo del frente de onda AA′ son fuentes de nuevas ondas más pequeñas, entonces poco tiempo después las nuevas ondas traslapadas formarán una nueva superficie, BB′, que puede considerarse como la envoltura de todas las ondas pequeñas. En la figura sólo se muestran algunas del infinito número de pequeñas ondas provenientes de algunas fuentes puntuales secundarias a lo largo de AA′ que se combinan para producir la envoltura lisa BB′. Conforme la onda se propaga, un segmento parece menos curvo. Muy lejos de la fuente original, las ondas casi forman un plano, como lo hacen las ondas del Sol, por ejemplo. En la Figura 29.4 se muestra una construcción en pequeñas ondas de Huygens para frentes de onda planos. En la Figura 29.5 puedes ver las leyes de reflexión y refracción ilustradas mediante el principio de Huygens.

**FIGURA 29.4**
El principio de Huygens aplicado a un frente de onda plano.

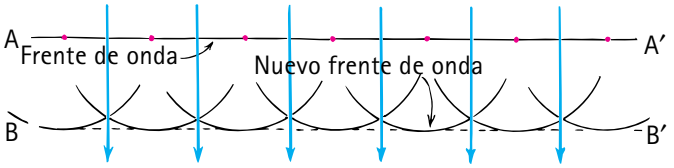



**FIGURA 29.5**
El principio de Huygens aplicado a (a) la reflexión y (b) la refracción. Observa que los rayos y los frentes de onda son perpendiculares entre sí.

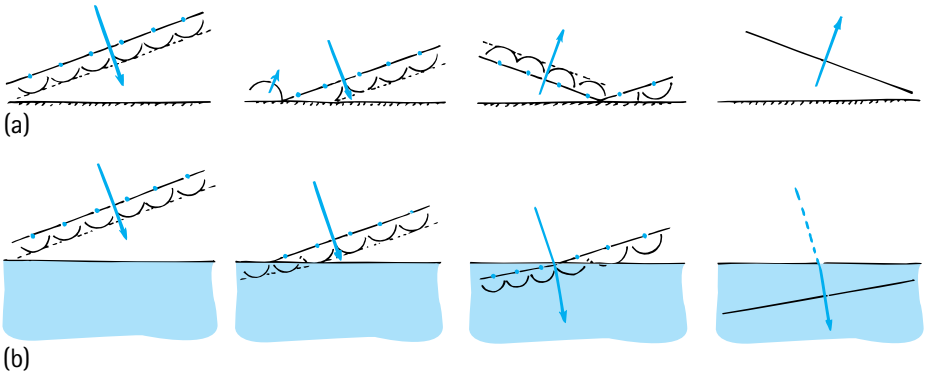
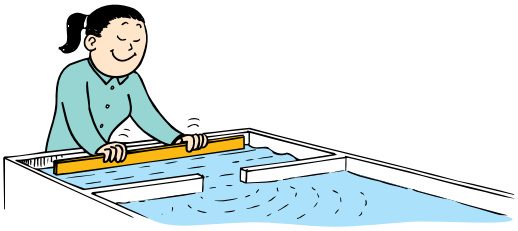



**FIGURA 29.6**
La regla de un metro que oscila crea ondas planas en el tanque de agua. El agua que oscila en la abertura actúa como una fuente de ondas. El agua se difracta a través de la abertura.



Puedes generar ondas planas en el agua cuando sumerges sucesivamente en la superficie un objeto con borde recto, como un metro, sostenido de forma horizontal (Figura 29.6). Las fotografías de la Figura 29.7 son vistas superiores de un tanque de ondas en el cual las ondas planas inciden sobre aberturas de varios tamaños (no se muestra el objeto con borde recto). En (a), donde la abertura es ancha, se ven las ondas planas seguir a través

**FIGURA 29.7**
Ondas planas que pasan por aberturas de varios tamaños. Mientras más pequeña es la abertura, mayor es el doblamiento de las ondas en los bordes; en otras palabras, mayor es la difracción.

de la abertura sin cambio, excepto en las esquinas, donde las ondas se doblan hacia la región de sombra, como predice el principio de Huygens. A medida que el ancho de la abertura se estrecha, como en (b), se transmite cada vez menos de la onda incidente, y la propagación de las ondas en la región de sombra se vuelve más pronunciada. Cuando la abertura es pequeña comparada con la longitud de onda de la onda incidente, como en (c), la veracidad de la idea de Huygens de que cada parte de un frente de onda puede considerarse como una fuente de nuevas ondas pequeñas se vuelve bastante evidente. A medida que las ondas inciden sobre la abertura estrecha, se observa fácilmente que el agua que chapotea hacia arriba y hacia abajo en la abertura actúa como una fuente "puntual" de las nuevas ondas que se abren en abanico en el otro lado de la barrera. Se dice que las ondas se *difractan* cuando se propagan hacia la región de sombra.

## 29.2 Difracción

Si alguien en otra habitación te llama a la puerta, el sonido parece provenir de la puerta (a menos que tengas paredes muy delgadas).

En el Capítulo 28 aprendiste que la luz puede doblar su trayectoria ordinaria en línea recta mediante reflexión y refracción, y ahora aprenderás otra forma en la que la luz se dobla. Cualquier doblamiento de la luz por otro medio distinto a la reflexión y la refracción se llama *difracción*. **Difracción** es el doblamiento de la luz cuando ésta pasa por el borde de un objeto, lo que crea un borde difuso. También ocurre cuando una onda pasa por una abertura. La difracción de las ondas de agua planas que se muestra en la Figura 29.7 sucede para todo tipo de ondas, incluidas las ondas de luz.

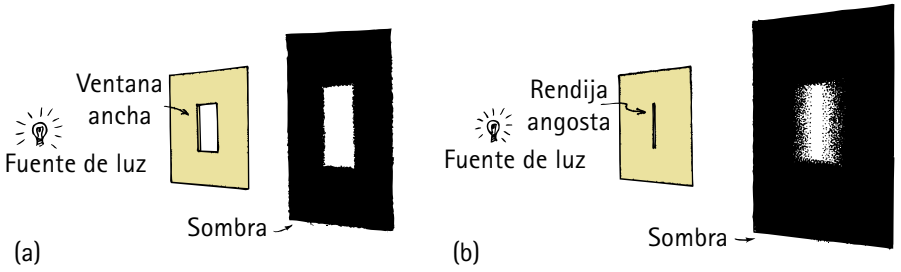



**FIGURA 29.8**
(a) La luz proyecta una sombra nítida con cierta borrosidad en sus bordes cuando la abertura es grande comparada con la longitud de onda de la luz. (b) Cuando la abertura es muy angosta, la difracción es más evidente y la sombra es más borrosa.

Cuando la luz pasa por una abertura que es grande comparada con la longitud de onda de la luz, ésta proyecta una sombra como la mostrada en la Figura 29.8a. Se observa una frontera bastante definida entre la luz y las áreas oscuras de la sombra. Pero si la luz pasa por una rendija hecha con una hoja de rasurar delgada sobre un cartón opaco, se ve que la luz se difracta (Figura 29.8b). La frontera definida entre la luz y las áreas oscuras desaparece y la luz se extiende como un abanico y produce un área brillante que se desvanece hacia la oscuridad sin bordes definidos. La luz se difracta.

En la Figura 29.9 aparece una gráfica de la distribución de intensidad de la luz difractada a través de una sola rendija delgada. Debido a la difracción, hay un aumento gradual de la intensidad luminosa en lugar de un cambio abrupto de oscuridad a claridad. Un fotodetector que barriera la pantalla percibiría un cambio gradual desde la ausencia de luz hasta la máxima intensidad de luz. (En realidad, existen delgadas franjas con intensidad a cualquier lado del patrón principal; dentro de poco verás que éstas son prueba de la interferencia, que es más pronunciada con una doble rendija o con múltiples rendijas.)

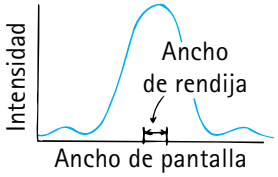



**FIGURA 29.9**
Interpretación gráfica de luz difractada a través de una sola rendija delgada.

La difracción no está confinada a rendijas estrechas o a aberturas en general, sino que puede verse para todas las sombras. En un análisis detallado, incluso la sombra más definida es un poco borrosa en el borde. Cuando la luz es de un solo color (monocromática), la difracción puede producir *franjas de difracción* en el borde de la sombra, como en la Figura 29.10. En la luz blanca, las franjas se mezclan para crear una mancha borrosa en el borde de una sombra.

**SCREENCAST: Difracción**

**FIGURA 29.10**
Las franjas de difracción son evidentes en las sombras de una luz láser monocromática (con una sola frecuencia). Estas franjas se rellenarían con multitudes de otras franjas si la fuente fuera de luz blanca.

La cantidad de difracción depende de la longitud de onda de la onda comparada con el tamaño de la obstrucción que proyecta la sombra. Las ondas más largas se difractan más. Son mejores para llenar sombras, razón por la cual los sonidos de las sirenas de niebla son ondas largas de frecuencia baja: para llenar cualquier "punto ciego". Lo mismo ocurre con las ondas de radio de la banda de transmisión AM estándar, que son muy largas comparadas con el tamaño de la mayoría de los objetos en su trayectoria. Las longitudes de onda de las ondas de radio AM van de 180 a 550 metros, y las ondas se doblan con facilidad alrededor de edificios y otros objetos que de otro modo estorbarían su paso. Una onda de radio con una longitud de onda larga no "ve" un edificio relativamente pequeño en su trayectoria, pero una onda de radio con una longitud de onda corta sí lo ve. Las ondas de radio de la banda FM van de 2.8 a 3.4 metros y no se doblan muy bien alrededor de los edificios. Ésta es una de las razones por las que la recepción FM con frecuencia es mala en ubicaciones donde AM llega fuerte y claro. En el caso de la recepción de radio, no se quieren "ver" los objetos en la trayectoria de las ondas de radio, de modo que la difracción no es algo malo.

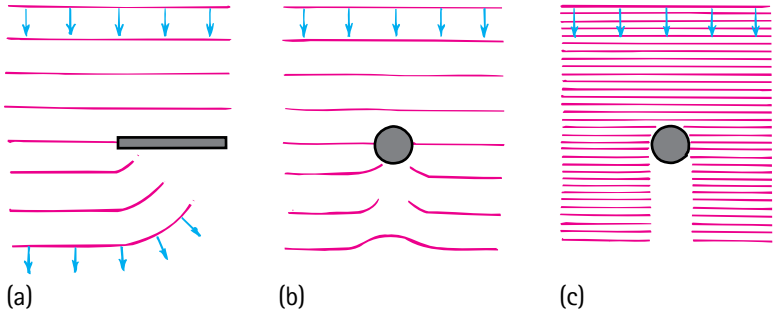



**FIGURA 29.11**
(a) Las ondas tienden a dispersarse hacia la región de sombra.
(b) Cuando la longitud de onda tiene más o menos el tamaño del objeto, la sombra pronto se llena.
(c) Cuando la longitud de onda es corta en relación con el tamaño del objeto, se proyecta una sombra más definida.

La difracción no es muy agradable cuando ves objetos muy pequeños con un microscopio. Si el tamaño de un objeto es aproximadamente el mismo que la longitud de onda de la luz, la difracción nubla la imagen. Si el objeto es más pequeño que la longitud de onda de la luz, no puede verse ninguna estructura. Toda la imagen se pierde por la difracción. No hay amplificación o perfección del diseño del microscopio que permita superar este límite de difracción fundamental.

Para reducir al mínimo este problema, los microscopistas pueden iluminar los objetos pequeños con haces de electrones en lugar de luz. En relación con las ondas de luz, los haces de electrones tienen longitudes de onda en extremo cortas. Los *microscopios electrónicos* aprovechan el hecho de que toda la materia tiene propiedades ondulatorias: un haz de electrones tiene una longitud de onda más corta que los de la luz visible. En un microscopio electrónico, en lugar de lentes ópticos se utilizan campos eléctricos y magnéticos para enfocar y amplificar las imágenes.

La difracción ocurre cuando una onda pasa por una abertura o por el borde de un objeto.

El que los detalles más pequeños puedan verse mejor con longitudes de onda más cortas es un hecho que el delfín emplea perfectamente cuando escanea su entorno con ultrasonido. Los ecos del sonido con longitud de onda larga brindan al delfín una imagen global de los objetos de su entorno. Para examinar con más detalle, el delfín emite sonidos con longitudes de onda más cortas. Como estudiaste en el Capítulo 20, el delfín siempre ha hecho de manera natural lo que los médicos ahora pueden hacer con los dispositivos de visualización ultrasónica.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Por qué un microscopista utiliza luz azul en lugar de luz blanca para iluminar los objetos que observa?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Hay menos difracción con la luz azul de longitud de onda más corta, de modo que el microscopista ve más detalles (como un delfín hermosamente investiga los detalles finos de su entorno con los ecos de sonido con longitudes de onda ultracorta).

## 29.3 Superposición e interferencia

Cuando dos ondas interactúan, la amplitud de la onda resultante es la suma de las amplitudes de las dos ondas. A esto se le conoce como principio de **superposición**. En general, este fenómeno se describe como **interferencia** (de acuerdo con lo que se estudió en los Capítulos 19 y 20). En la Figura 29.12 se revisan las interferencias constructiva y destructiva. Se observa que la superposición de un par de ondas idénticas en fase mutua produce una onda de la misma frecuencia pero con el doble de amplitud. Si las ondas están exactamente media longitud de onda fuera de fase, su superposición da por resultado una cancelación completa. Si están fuera de fase por otras cantidades, ocurre una cancelación parcial.

**SCREENCAST: Interferencia de la luz**

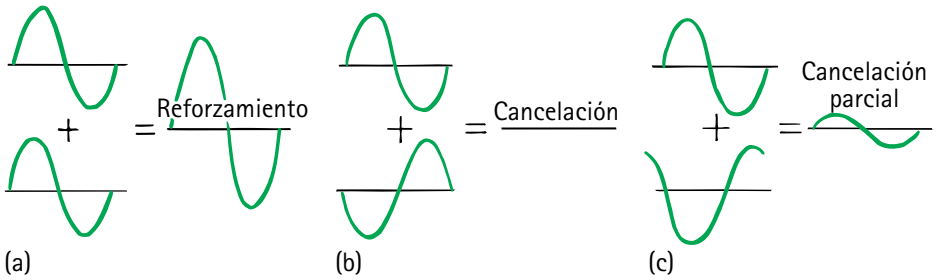



**FIGURA 29.12**
Interferencia de ondas.

La interferencia de las ondas en el agua es un fenómeno que se observa con frecuencia, como se muestra en la Figura 29.13. En algunos lugares, las crestas traslapan con crestas; en otros lugares, las crestas traslapan con valles de otras ondas.

**FIGURA 29.13**
Interferencia de ondas de agua.

Bajo condiciones más controladas, un par de fuentes de ondas colocadas lado a lado producen patrones interesantes (Figura 29.14). La superficie del agua en tanques poco profundos (tanques de ondas similares al de Jennie en la tercera fotografía de apertura de capítulo) se golpea con cierta frecuencia en dos lugares mientras los patrones producidos se fotografían desde arriba. Observa que las zonas de interferencia constructiva y destructiva se extienden hasta los lados de los tanques de ondas, donde el número de estas regiones y su tamaño dependen de la distancia entre las fuentes de ondas y de la longitud de onda (o la frecuencia) de las ondas. La interferencia no se limita a las ondas de agua que puedes ver con facilidad, sino que es una propiedad de todas las ondas.

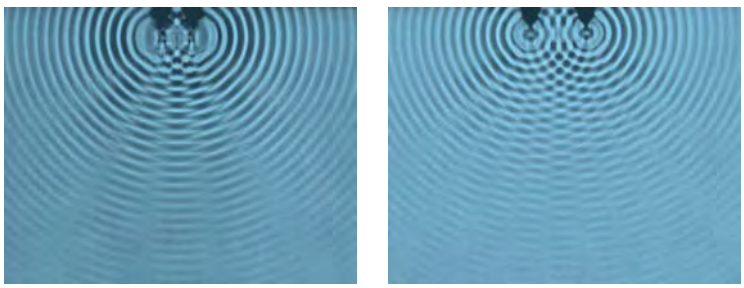


**FIGURA 29.14**
Patrones de interferencia de ondas traslapadas provenientes de dos fuentes vibratorias.

En 1801, la naturaleza ondulatoria de la luz se demostró de un modo convincente cuando el físico y médico británico Thomas Young realizó su ahora famoso

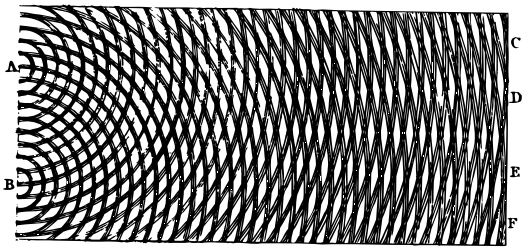



**FIGURA 29.15**
Dibujo original de Thomas Young de un patrón de interferencia producido por dos fuentes. Los círculos oscuros representan crestas de onda; los espacios blancos entre las crestas representan valles. La interferencia constructiva ocurre donde las crestas se traslapan con otras crestas o los valles se traslapan con otros valles. Las letras C, D, E y F marcan regiones de interferencia destructiva.

experimento de interferencia.[1] Young descubrió que la luz dirigida a través de dos orificios puntuales cercanos entre sí se recombina y produce franjas de brillo y oscuridad sobre una pantalla detrás. Las franjas brillantes se forman cuando una cresta de la onda luminosa que pasa por un orificio y una cresta de la onda luminosa que pasa por el otro orificio llegan a la pantalla al mismo tiempo. Las franjas oscuras se forman cuando una cresta de una onda y un valle de la otra llegan al mismo tiempo. La Figura 29.15 muestra el dibujo de Young del patrón de ondas superpuestas procedentes de dos fuentes. Cuando su experimento se realizó con dos rendijas cercanas, en lugar de orificios puntuales, los patrones de franjas son líneas rectas (Figura 29.17).

**FIGURA 29.16**
Las franjas brillantes se forman cuando las ondas provenientes de ambas rendijas llegan en fase; las zonas oscuras son resultado del traslape de ondas que están fuera de fase.

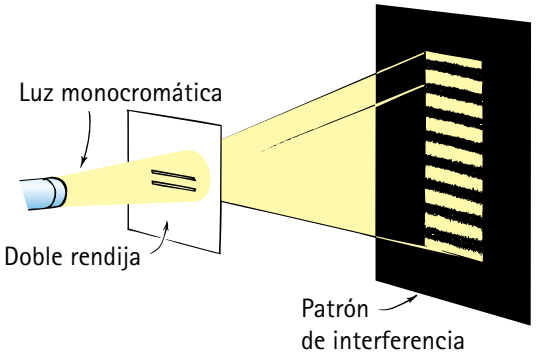



**FIGURA 29.17**
Cuando la luz monocromática pasa por dos rendijas cercanas entre sí, se produce un patrón de interferencia formado por rayas.

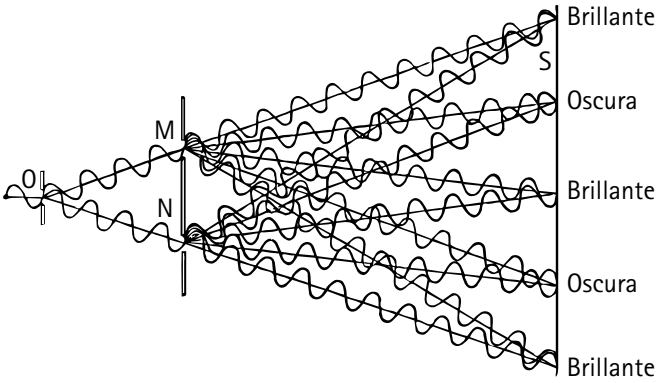
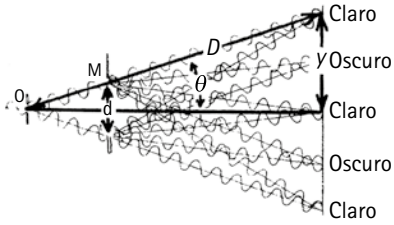



**FIGURA 29.18**
La luz proveniente de O pasa por las rendijas M y N y produce un patrón de interferencia sobre la pantalla S.

En la Figura 29.18 se observa cómo la serie de líneas brillantes y oscuras es resultado de las diferentes longitudes de las trayectorias que van de las rendijas a la pantalla.[2] Para la franja brillante central, las trayectorias de las dos rendijas tienen




[1]Thomas Young leía con fluidez a los 2 años de edad; a los 4, ya había leído la Biblia dos veces; a los 14, sabía ocho idiomas. En su vida adulta, fue un médico y científico que contribuyó a la comprensión de los fluidos, el trabajo y la energía, así como de las propiedades elásticas de los materiales. Fue la primera persona en lograr avances en el desciframiento de los jeroglíficos egipcios. No hay duda de ello: ¡Thomas Young fue un muchacho brillante!

[2]En el laboratorio puedes determinar la longitud de onda de la luz con mediciones basadas en la Figura 29.18. La ecuación para el primer máximo de interferencia fuera del centro para dos o más rendijas es

$$\lambda = d \operatorname{sen} \theta$$

donde $\lambda$ es la longitud de onda de la luz que se difracta, $d$ es la distancia entre las rendijas adyacentes y $\theta$ es el ángulo entre líneas respecto de la franja de luz central y la primera franja de interferencia constructiva fuera del centro. De acuerdo con el diagrama, sen $\theta$ es la razón entre la distancia $y$ la distancia $D$, donde $y$ es la distancia sobre la pantalla entre la franja central de luz y la primer franja de interferencia constructiva en cualquier lado, y $D$ es la distancia entre las franjas y las rendijas (que, en la práctica, es mucho mayor que lo mostrado aquí).

la misma longitud y, por tanto, las ondas llegan en fase y se refuerzan entre sí. Las franjas oscuras en cualquier lado de la franja central resultan de una trayectoria que es más larga (o más corta) por media longitud de onda, de modo que las ondas llegan media longitud de onda fuera de fase. Los otros conjuntos de franjas oscuras ocurren donde las trayectorias difieren por múltiplos nones de media longitud de onda: 3/2, 5/2, y así sucesivamente.

Al realizar este experimento con doble rendija, supón que cubres una de las rendijas, de modo que la luz pase sólo por una rendija. Entonces la luz formará un abanico e iluminará la pantalla para formar un patrón de difracción simple, como se estudió antes (Figuras 29.8b y 29.9). Si cubres la otra rendija y dejas pasar la luz sólo por la rendija recién descubierta, obtienes la misma iluminación sobre la pantalla, pero desplazada un poco debido a la diferencia en la ubicación de la rendija. Si no tuvieras el conocimiento, esperarías que, con ambas rendijas abiertas, el patrón simplemente fuera la suma de los patrones de difracción de cada una de las rendijas, como lo sugiere la Figura 29.19a. Pero esto no sucede. Más bien, el patrón formado es uno de bandas de luz y oscuridad alternadas, como se muestra en la Figura 29.19b. Se tiene un patrón de interferencia. Por cierto: la interferencia de las ondas de luz no crea ni destruye energía luminosa; sólo la redistribuye.

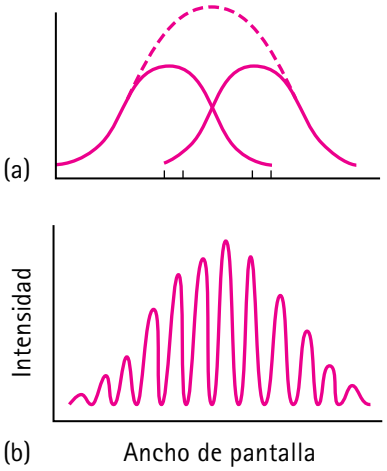



**FIGURA 29.19**
La luz que se difracta a través de cada una de las rendijas dobles no forma una superposición de intensidades como se sugiere en (a). El patrón de intensidades, debido a la interferencia, es como se muestra en (b).

### PUNTO DE CONTROL

1. **Si las rendijas dobles se iluminaran con luz roja monocromática (una sola frecuencia), ¿las franjas estarían más o menos espaciadas entre sí que si se iluminaran con luz azul monocromática?**
2. **¿Por qué es importante usar luz monocromática?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Más espaciadas. ¿Puedes ver en la Figura 29.18 que, para las ondas más largas de la luz roja, resultaría una trayectoria un poco más larga (y, por tanto, un poco más desplazada) de la rendija de entrada a la pantalla?
2. Si las rendijas difractaran la luz de varias longitudes de onda, las franjas oscuras para una longitud de onda se llenarían con las franjas brillantes para otra, lo que resulta en un patrón de franjas no perceptible. Si no has visto esto, asegúrate de pedir a tu instructor que lo demuestre.

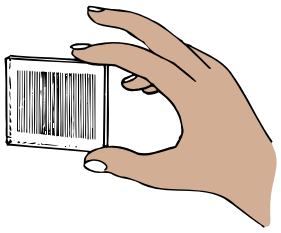


**FIGURA 29.20**
En un espectrómetro, puede usarse una rejilla de difracción en lugar de un prisma.

Los patrones de interferencia no se limitan a rendijas individuales o dobles. Una multitud de rendijas menos espaciadas constituyen una *rejilla de difracción*. Estos dispositivos, como los prismas, dispersan la luz blanca en colores. Mientras que un prisma separa los colores de la luz mediante refracción, una rejilla de difracción separa los colores mediante interferencia. Éstas se utilizan en los dispositivos llamados *espectrómetros*, que estudiarás en el Capítulo 30. Las rejillas de difracción están rayadas con pequeños surcos y dispersan la luz blanca en bandas de color. Son comunes en algunos tipos de bisutería y en las "gafas de fiesta" (Figura 29.21). Las delgadas ranuras de las plumas de algunas aves dispersan hermosos colores. Los colores creados por difracción son especialmente vívidos en las superficies reflectoras de los DVD.

**FIGURA 29.21**
Lámparas de un candelabro vistas a través de gafas de fiesta con una rejilla de difracción.

# 29.4 Interferencia en películas delgadas

Colores vívidos también se producen mediante la doble reflexión de la luz desde las superficies superior e inferior de películas delgadas. Los colores van desde franjas de luz monocromática hasta los brillantes arreglos de colores que se ven en las pompas de jabón.

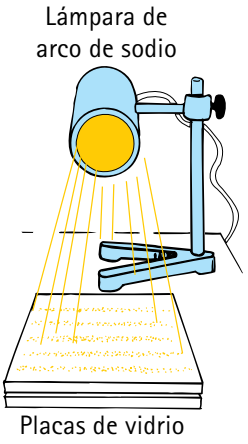



**FIGURA 29.22**
Franjas de interferencia producidas cuando luz monocromática se refleja desde dos placas de vidrio que tienen una cuña de aire entre ellas.

**SCREENCAST: Interferencia de colores**

## Interferencia en películas delgadas de un solo color

Una demostración sencilla de la interferencia de la luz puede montarse con una fuente de luz monocromática y un par de pedazos de vidrio. Una lámpara de vapor de sodio es una buena fuente de luz monocromática. Las dos piezas de vidrio se colocan una encima de la otra, como se muestra en la Figura 29.22. En un extremo, se coloca entre las placas un pedazo de papel muy delgado para proporcionar una película muy delgada de aire con forma de cuña en medio de las placas. Si el ojo está en una posición para ver la imagen reflejada de la lámpara, la imagen no será continua, sino que estará constituida por bandas oscuras y brillantes.

La causa de estas bandas es la interferencia entre las ondas reflejadas por el vidrio sobre las superficies superior e inferior de la cuña de aire, como se muestra en la vista exagerada de la Figura 29.23. La luz que se refleja en el punto P llega hasta el ojo por dos trayectorias diferentes. En una de estas trayectorias, la luz se refleja en la parte superior de la cuña de aire; en la otra trayectoria, se refleja en el lado inferior. Si el ojo se enfoca sobre el punto P, ambos rayos llegan al mismo lugar en la retina del ojo. Pero estos rayos recorrieron diferentes distancias y pueden encontrarse en fase o fuera de fase, de acuerdo con el grosor de la cuña de aire; esto es, de cuánta más distancia ha recorrido un rayo en comparación con el otro. Cuando se examina toda la superficie del vidrio, se observan regiones oscuras y brillantes alternadas: las porciones oscuras, donde el grosor del aire es justo el necesario para producir interferencia destructiva, y las porciones brillantes, donde la cuña de aire se adelgaza o se engrosa justo en la cantidad adecuada para traer por resultado el reforzamiento de la luz. De modo que las bandas oscuras y brillantes son generadas por la interferencia de ondas de luz reflejadas en los dos lados de la película delgada.[3]

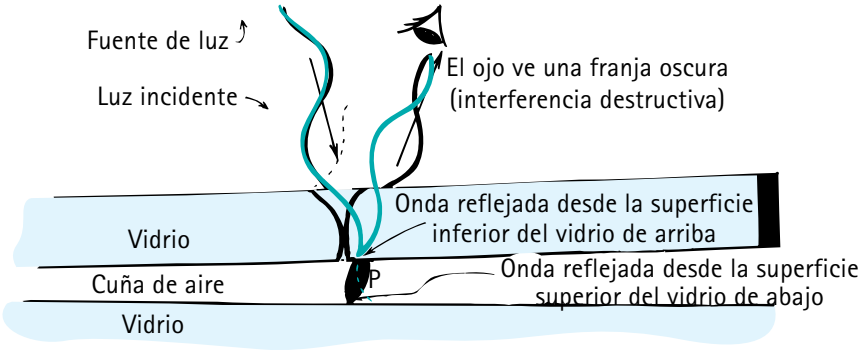



**FIGURA 29.23**
Reflexión en las superficies superior e inferior de una "película delgada de aire". (Una onda se dibujó en negro para mostrar cómo está fuera de fase con la onda azul después de la reflexión.)

[3]Los cambios de fase en algunas superficies reflejantes también contribuyen a la interferencia. Por simplicidad y brevedad, este tema se abordará sólo con esta nota. En resumen, cuando la luz en un medio se refleja en la superficie de un segundo medio en el que la rapidez de la luz es menor (cuando existe un mayor índice de refracción), hay un cambio de fase de 180° (esto es, media longitud de onda). Sin embargo, no ocurre un cambio de fase cuando el segundo medio es uno que transmite la luz con mayor rapidez (y tiene un menor índice de refracción). En el ejemplo de la cuña de aire, no ocurre un cambio de fase por la reflexión en la superficie superior vidrio-aire, y sí ocurre un cambio en la superficie inferior aire-vidrio. De modo que, en el ápice de la cuña de aire, donde el grosor tiende a cero, el cambio de fase produce una cancelación, y la cuña es oscura. Lo mismo ocurre con una película jabonosa tan delgada que su grosor es mucho menor que la longitud de onda de la luz. Por esta razón, las partes de una película que son extremadamente delgadas parecen negras. Las ondas de todas las frecuencias se cancelan.

Si las superficies de las placas de vidrio son perfectamente planas, las bandas son uniformes. Pero si las superficies no son perfectamente planas, las bandas se distorsionan. La interferencia de la luz ofrece un método en extremo sensible para comprobar lo plano de las superficies. Se dice que las superficies que producen franjas uniformes son ópticamente planas; esto significa que las irregularidades en la superficie son pequeñas en relación con la longitud de onda de la luz visible (Figura 29.24).

Cuando una lente que es plana en la parte superior y tiene una ligera curvatura convexa en la parte inferior se coloca en una placa de vidrio ópticamente plana y se ilumina desde arriba con luz monocromática, se produce una serie de anillos claros y oscuros. Este patrón se conoce como *anillos de Newton* (Figura 29.25). Estos anillos claros y oscuros son del mismo tipo que las franjas observadas con superficies planas. Ésta es una técnica de comprobación útil para pulir lentes de precisión.

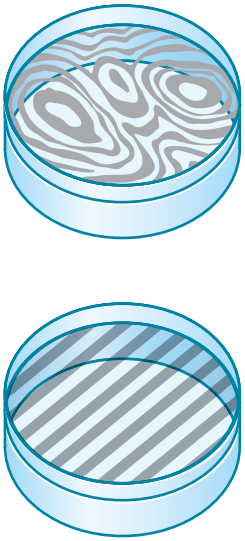


**FIGURA 29.24**
Planos ópticos para comprobar lo plano de las superficies. Las franjas rectas indican lisura óptica.

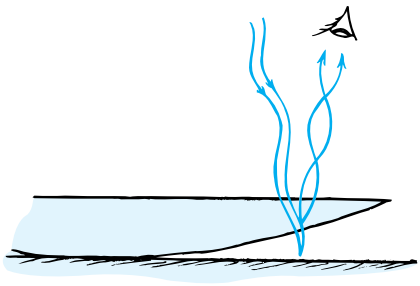


**FIGURA 29.25**
Anillos de Newton.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Cómo diferirá el espaciamiento entre los anillos de Newton cuando se iluminen con luz roja y con luz azul?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Los anillos estarán más espaciados con la longitud de onda más larga de la luz roja que con las ondas más cortas de la luz azul. ¿Ves la razón geométrica de esto?

## Colores de interferencia

Todo mundo ha apreciado el hermoso espectro de colores reflejados en una pompa de jabón o en gasolina sobre una calle mojada. Estos colores se producen por la *interferencia* de las ondas de luz. Este fenómeno a menudo se llama *iridiscencia* y se observa en las películas delgadas transparentes.

Una pompa de jabón se ve iridiscente en la luz blanca cuando el grosor de la película jabonosa tiene aproximadamente el mismo tamaño que la longitud de onda de la luz. Las ondas luminosas reflejadas desde las superficies exterior e interior de la película recorren diferentes distancias. Cuando se ilumina con luz blanca, la película puede ser justo del grosor adecuado en un lugar para generar la interferencia destructiva de, por decir, la luz roja. Cuando la luz roja se sustrae de la luz blanca, la mezcla restante aparecerá como el color complementario del rojo, que es el cian. En otro lugar, donde la película es más delgada, un color diferente puede cancelarse por interferencia, y la luz que se ve será de su color complementario.

Lo mismo ocurre con la gasolina sobre una calle mojada (Figura 29.26). La luz se refleja tanto en la superficie superior de la gasolina como en la superficie inferior gasolina-agua. Si el grosor de la gasolina es tal que cancele el azul, como la figura sugiere, entonces la superficie de la gasolina aparece amarilla a la vista. Esto es porque el azul se sustrae del blanco, lo que deja al color complementario, el amarillo. Entonces, los diferentes colores corresponden a distintos grosores de la película delgada, lo que ofrece un vívido "mapa de contornos" de diferencias microscópicas en las "elevaciones" de la superficie. Sobre un

Los colores de las pompas de jabón resultan de la interferencia de la luz reflejada en las superficies interior y exterior de la película jabonosa. Cuando un color se cancela, lo que ves es su color complementario.

campo de visión más amplio, pueden verse colores diferentes, incluso si el grosor de la película de gasolina es uniforme. Esto se debe al grosor aparente de la película: la luz que llega al ojo procedente de diferentes partes de la superficie se refleja en diferentes ángulos y atraviesa diferentes grosores. Si la luz incide en un ángulo rasante, por ejemplo, el rayo transmitido en la superficie inferior de la gasolina recorre mayor distancia. En este caso se cancelan las ondas más largas, y aparecen diferentes colores.

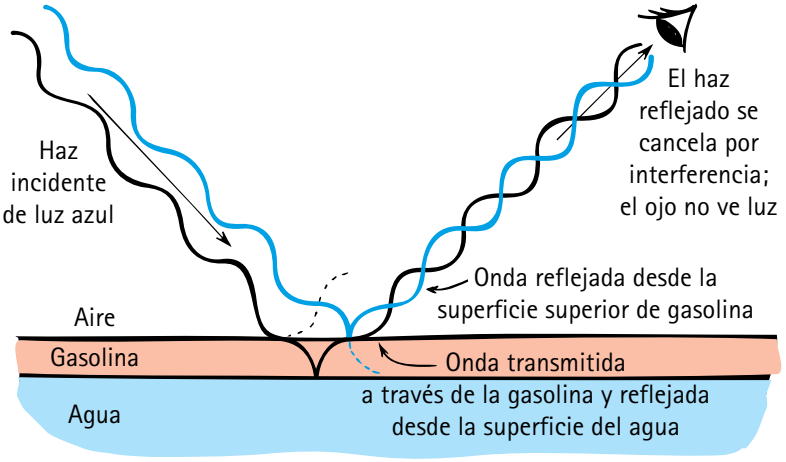



**FIGURA 29.26**
La película delgada de gasolina tiene justo el grosor adecuado para cancelar las reflexiones de luz azul de las superficies superior e inferior. Cuando el haz incidente es luz blanca, los ojos ven amarillo. Si la película fuese más delgada, tal vez se cancelaría el violeta con una longitud de onda más corta. (De nuevo, una onda se dibuja en negro para mostrar cómo está fuera de fase con la onda azul después de la reflexión.)

Los platos lavados en agua jabonosa y mal enjuagados tienen una delgada película de jabón sobre ellos. Sostén uno de estos platos hacia una fuente de luz, de modo que puedas ver los *colores de interferencia*. Luego gira el plato hacia una nueva posición, manteniendo la vista sobre la misma parte del plato, y el color cambiará. La luz que se refleja desde la superficie inferior de la película jabonosa transparente cancela la luz que se refleja desde la superficie superior de la película jabonosa. Las ondas de luz de distintas longitudes de onda se cancelan para diferentes ángulos. Los colores de interferencia se ven mejor en las pompas de jabón (Figura 29.27). Observarás que estos colores son predominantemente cian, magenta y amarillo, debido a la sustracción de los primarios rojo, verde y azul, y otros colores de una sola longitud de onda.

**FIGURA 29.27**
El magenta que se ve en las pompas de jabón de Emily se debe a la cancelación de la luz verde. ¿Qué color primario se canceló para producir cian?

**VIDEO: Interferencia en las pompas de jabón**

La interferencia ofrece una forma de medir la longitud de onda de la luz y otra radiación electromagnética. También posibilita la medición de distancias en extremo pequeñas con gran exactitud. Los instrumentos llamados *interferómetros*, que aplican el principio de la interferencia, son los instrumentos más exactos conocidos para medir distancias pequeñas.

## PRACTICANDO LA FÍSICA

Realiza este experimento de física en el lavabo de tu cocina. Sumerge una taza para café de color oscuro (los colores oscuros constituyen el mejor fondo para ver los colores de interferencia) en detergente para trastes y luego sostenla de costado y observa la luz reflejada en la película jabonosa que cubre su boca. Colores arremolinados aparecerán a medida que el jabón baje para formar una cuña que se vuelve más gruesa en el fondo. El torbellino de colores parece corresponder a varios grosores de la delgada película jabonosa. La parte superior se vuelve más delgada, tan delgada que parece negra. Cualquiera sea su longitud de onda, la luz que se refleja en la superficie interior invierte su fase, vuelve a unirse a la luz que se refleja en la superficie exterior y se cancela. La película pronto se vuelve tan delgada que revienta.

## 29.5 Polarización

La interferencia y la difracción constituyen la mejor evidencia de que la luz es similar a una onda. Como aprendiste en el Capítulo 19, las ondas pueden ser longitudinales o transversales. Las ondas sonoras son longitudinales, lo cual significa que el movimiento vibratorio es *a lo largo* de la dirección en la que viaja la onda. Pero cuando uno sacude una soga tensa, el movimiento vibratorio que viaja a lo largo de la soga es perpendicular, o *transversal*, a la soga. Tanto las ondas longitudinales como las transversales muestran efectos de interferencia y difracción. Entonces, ¿las ondas de luz son longitudinales o transversales?

La **polarización** de las ondas de luz demuestra que son transversales. Sólo las ondas transversales pueden polarizarse. Considera la soga tensa que se sacude en la Figura 29.28. Una onda transversal viaja a lo largo de la soga en un plano. Se dice que tal onda está *plano-polarizada* o *polarización planar*,[4] lo cual significa que las ondas que viajan a lo largo de la soga están confinadas a un solo plano. Si sacudes la soga hacia arriba y hacia abajo, produces una onda plano-polarizada verticalmente. Si la sacudes de lado a lado, produces una onda plano-polarizada horizontalmente.

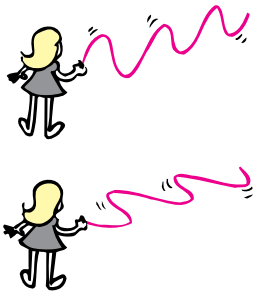


**FIGURA 29.28**
Una onda plano-polarizada verticalmente y una onda plano-polarizada horizontalmente.

Un solo electrón en vibración puede emitir una onda electromagnética que sea plano-polarizada. El plano de polarización coincidirá con la dirección de vibración del electrón y es el plano de vibración del campo eléctrico. Entonces, un electrón que acelera verticalmente emite luz que está polarizada verticalmente, en tanto que un electrón que acelera horizontalmente emite luz que está polarizada horizontalmente (Figura 29.29).

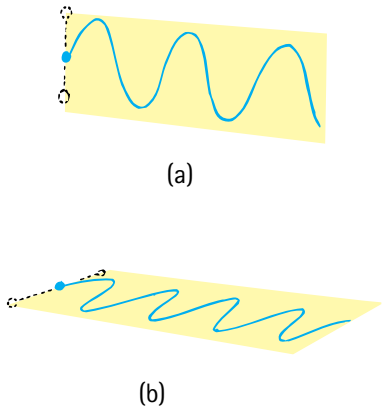



**FIGURA 29.29**
(a) Una onda plano-polarizada verticalmente de una carga que vibra verticalmente.
(b) Una onda plano-polarizada horizontalmente de una carga que vibra horizontalmente.

Una fuente de luz común (como una lámpara incandescente, una lámpara fluorescente o la llama de una vela) emite luz que no está polarizada. Esto se debe a que no hay una dirección de vibración preferida para los electrones en aceleración que emiten la luz. Los planos de vibración pueden ser tan numerosos como los electrones en aceleración que los producen. En la Figura 29.30a se representan algunos planos. Todos estos planos pueden representarse con líneas radiales (Figura 29.30b) o, de manera más simple, mediante vectores en dos direcciones perpendiculares entre sí (Figura 29.30c), como si todos los vectores de la Figura 29.30b se hubieran descompuesto en sus componentes horizontales y verticales. Este esquema más simple representa luz no polarizada. La luz polarizada se representaría mediante un solo vector.

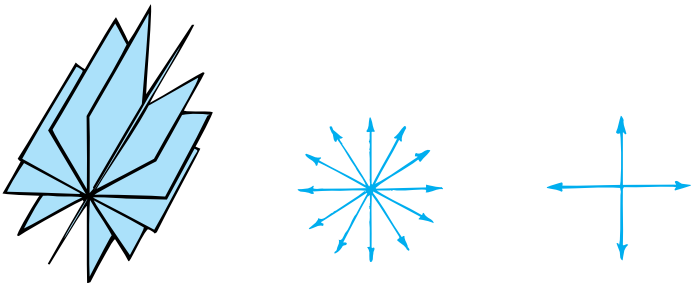



**FIGURA 29.30**
Representaciones de ondas plano-polarizadas. Las tres representaciones muestran la parte eléctrica de la onda electromagnética.

Todos los cristales transparentes que por naturaleza tengan una forma no cúbica tienen la propiedad de transmitir la luz con una polarización de manera diferente a la luz con otra polarización. Ciertos cristales[5] no sólo dividen la luz no polarizada en dos haces internos polarizados en ángulos rectos entre sí, sino que también absorben intensamente un haz mientras transmiten el otro (Figura 29.31). La turmalina es uno de estos cristales comunes, pero, por desgracia, la luz transmitida tiene color. Sin embargo, la herapatita hace el trabajo sin decoloración. Cristales microscópicos de herapatita se incrustan entre hojas de celulosa en una alineación uniforme y se usan para fabricar filtros Polaroid. Algunas hojas Polaroid consisten en ciertas moléculas alineadas en lugar de pequeños cristales.[6]

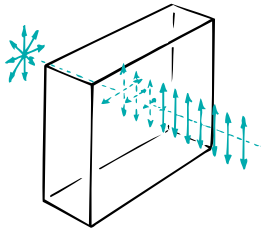


**FIGURA 29.31**
Un componente de la luz no polarizada incidente se absorbe, lo que resulta en una luz polarizada saliente.

Si observas luz no polarizada a través de un filtro Polaroid, puedes girar el filtro en cualquier dirección y la luz parecerá no cambiar. Pero si observas luz polarizada y giras

[4]La luz también puede polarizarse de manera circular y elíptica, que son combinaciones de polarizaciones transversales. Pero no se estudiarán estos casos.

[5]Llamados *dicroicos*.

[6]Las moléculas son de yodo polimérico en una hoja de alcohol polivinílico o polivinileno.

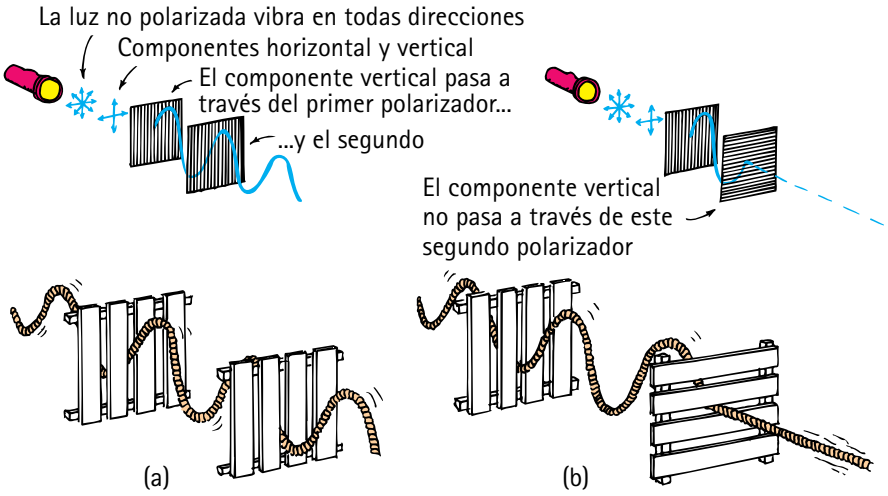



**FIGURA 29.32**
La analogía de la soga ilustra el efecto de los Polaroid cruzados.

**SCREENCAST: Polarización de la luz**

el filtro, progresivamente puedes cortar más y más luz hasta que ésta se bloquee por completo. Un Polaroid ideal transmitirá 50% de la luz incidente no polarizada. Desde luego, este 50% está polarizado. Cuando dos Polaroid se colocan de modo que sus ejes de polarización están alineados, la luz se transmitirá a través de ambos (Figura 29.32a). Si sus ejes están en ángulos rectos entre sí (en este caso se dice que los filtros están *cruzados*), no penetra luz en el par (Figura 29.32b). (En realidad, algo de luz con las longitudes de onda más cortas logra pasar, mas no en grado significativo.) Cuando se utilizan Polaroid en pares como éste, al primero se le llama *polarizador* y al segundo se le llama *analizador*.[7]

Mucha de la luz reflejada en las superficies no metálicas está polarizada. El destello del vidrio o del agua es un buen ejemplo. Excepto por el caso de una incidencia perpendicular, el rayo reflejado contiene más vibraciones paralelas a la superficie reflectora, en tanto que el haz transmitido contiene más vibraciones en ángulo recto con las vibraciones de la luz reflejada (Figura 29.35). Esto es análogo a lanzar rocas planas sobre la superficie de un estanque. Cuando las rocas golpean con sus caras paralelas a la superficie, se reflejan fácilmente, pero si golpean con sus caras inclinadas a la superficie, se "refractan" hacia el agua. El destello de las superficies reflectoras puede disminuir mucho con el uso de gafas Polaroid. Los ejes de polarización de las gafas son verticales porque la mayor parte de los destellos se reflejan de superficies horizontales.

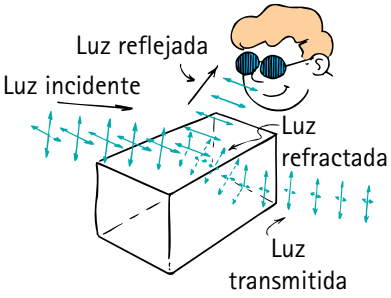



**FIGURA 29.33**
La mayor parte del destello proveniente de superficies no metálicas está polarizado. Observa cómo los componentes de la luz incidente paralelos a la superficie se reflejan y cómo los componentes perpendiculares a la superficie pasan a través de la superficie hacia el medio.

**FIGURA 29.34**
La luz se transmite cuando los ejes de los Polaroid están alineados (a), pero se absorbe cuando Ludmila gira uno de modo que los ejes estén en ángulo recto uno con respecto al otro (b). Cuando ella inserta un tercer Polaroid en ángulo entre los Polaroid cruzados, la luz se transmite de nuevo (c). ¿Por qué? (Para conocer la respuesta, después de que la hayas razonado un poco, consulta el Apéndice D, "Aplicaciones de los vectores".)

[7]En un filtro Polaroid común, moléculas de cadena larga se orientan con sus ejes perpendiculares al eje de polarización, y preferentemente *absorben* (en lugar de transmitir) luz polarizada a lo largo de su longitud, en forma muy parecida a como una antena absorbe ondas de radio. Dichos filtros están en contraste con la analogía de la soga a través de la ventana de la Figura 29.32. Para cualquier tipo de filtro, lo que hay que aprender es que los componentes transmitido y absorbido de la onda están en ángulo recto uno con respecto al otro.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Cuál par de gafas es más adecuada para los conductores de automóviles? (Los ejes de polarización se muestran con las líneas rectas.)**

(a) (b) (c)

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Las gafas (a) son las más adecuadas porque el eje vertical bloquea la luz polarizada horizontalmente, lo que constituye la mayoría de los destellos de las superficies horizontales. Las gafas (c) son adecuadas para ver películas 3D.

**FIGURA 29.35**
Las gafas Polaroid bloquean la luz que vibra horizontalmente. Cuando las gafas se traslapan en ángulo recto, no pasa luz.

## Visualización tridimensional

La visión en tres dimensiones depende principalmente del hecho de que ambos ojos proporcionan sus impresiones de manera simultánea (o casi) y cada ojo ve la escena desde un ángulo un poco diferente. Esto es *paralaje*, que es evidente cuando ves un dedo vertical a la distancia de tu brazo y ves cómo parece cambiar de posición de izquierda a derecha conforme cierras cada ojo de forma alternada. Con ambos ojos abiertos tiendes a ver un poco "alrededor" de tu dedo. Si ves el par de dibujos de la Figura 29.36 en tal forma que el ojo izquierdo observe la imagen izquierda al tiempo que el derecho observa la imagen derecha, verás una imagen estereográfica con profundidad. Los dibujos ilustran una visión estereográfica de la estructura cristalina del hielo.

Los copos de nieve que aparecen en un solo plano en el par de dibujos de la Figura 29.37 se ven en diferentes planos cuando se ven estereoscópicamente.

La polarización ocurre sólo con ondas transversales. De hecho, es una forma importante de determinar si una onda es transversal o longitudinal.

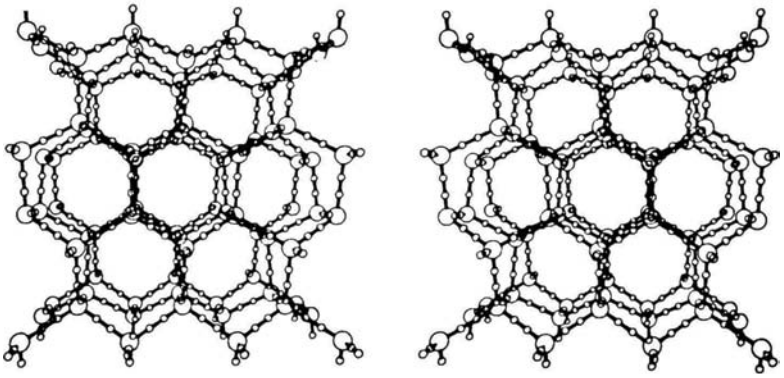


**FIGURA 29.36**
La estructura cristalina del hielo en estéreo. Verás profundidad cuando tu cerebro combine las visiones del ojo izquierdo que observa la figura izquierda y el ojo derecho que observa la figura derecha. Para lograr esto, enfoca tus ojos para visión distante antes de observar esta página. Sin cambiar tu foco, observa la página y cada figura parecerá doble. Luego ajusta tu foco de modo que las dos imágenes internas se traslapen para formar una imagen compuesta central. La práctica hace al maestro. (Si en vez de ello *cruzas* los ojos para traslapar las figuras, ¡lo cercano y lo lejano se invierten!)

**VIDEO: Luz polarizada y visión 3D**

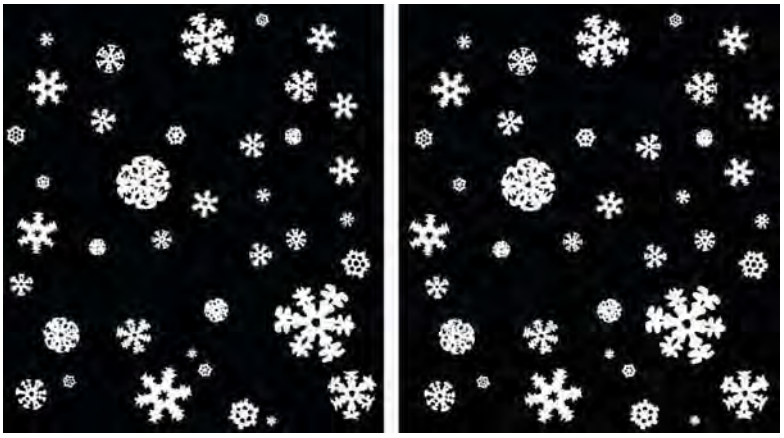


**FIGURA 29.37**
Visión estereoscópica de copos de nieve. Observa estas figuras de la misma manera que la Figura 29.36.

**FIGURA 29.38**
Un visor estereoscópico.

El visor estereoscópico portátil, familiar para tus abuelos (Figura 29.38), simula el efecto de profundidad. En este dispositivo hay dos transparencias fotográficas (o diapositivas) tomadas desde posiciones un poco diferentes. Cuando se ven al mismo tiempo, el arreglo es tal que el ojo izquierdo ve la escena como fotografiada desde la izquierda, y el ojo derecho la ve como fotografiada desde la derecha. Como resultado, los objetos de la escena se hunden en bajorrelieve en la perspectiva correcta, lo que produce la profundidad aparente de la imagen. El dispositivo se construye de modo que cada ojo ve sólo la vista adecuada. No hay ninguna posibilidad de que un ojo vea ambas vistas. Si retiras las diapositivas del visor y proyectas cada vista sobre una pantalla con un proyector de diapositivas (de modo que las vistas se superpongan), resulta una imagen borrosa.

*La prueba de todo conocimiento*
*es el experimento.*
*El experimento es el único juez*
*de la "verdad" científica.*
Richard P. Feynman

*La prueba de todo conocimiento*
*es el experimento.*
*El experimento es el único juez*
*de la "verdad" científica.*
Richard P. Feynman

**FIGURA 29.39**
Con tus ojos enfocados para ver de lejos, la segunda y la cuarta líneas parecen estar más alejadas; si cruzas los ojos, la segunda y la cuarta líneas parecen estar más cerca.

Esto se debe a que cada ojo ve ambas vistas al mismo tiempo. Aquí es donde intervienen los filtros Polaroid. Si colocas los Polaroid enfrente de los proyectores, de modo que estén en ángulo recto uno con respecto al otro, y ves la imagen polarizada con unas gafas polarizadas en la misma orientación, cada ojo verá la vista adecuada como con el visor estereoscópico (Figura 29.39). Entonces verás una imagen en tres dimensiones.

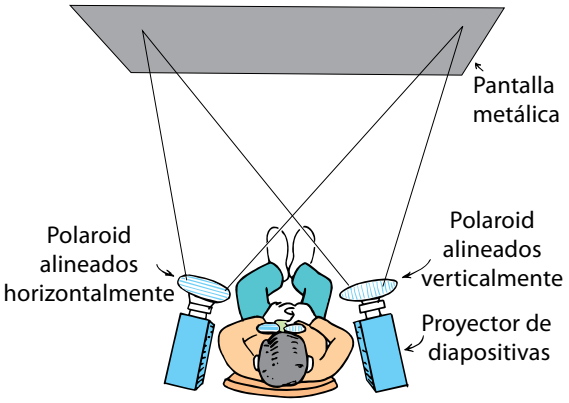



**FIGURA 29.40**
Un programa 3D que utiliza Polaroid. El ojo izquierdo sólo ve luz polarizada del proyector izquierdo, el ojo derecho sólo ve luz polarizada del proyector derecho, y ambas vistas se fusionan en el cerebro para producir profundidad.

La profundidad también se observa en los estereogramas generados por computadora, como en la Figura 29.41. Aquí, los patrones un poco diferentes no son evidentes en una vista casual. Usa el procedimiento para ver las figuras estereoscópicas anteriores. Una vez que domines la técnica de visualización, dirígete al supermercado local y comprueba la variedad de estereogramas en pósteres y libros.

**pti**

- Espera la autoestereoscopia: 3D sin gafas Polaroid. El sistema se basa en lentes lenticulares que proyectan una imagen ligeramente diferente a cada ojo, lo que crea la ilusión de profundidad.

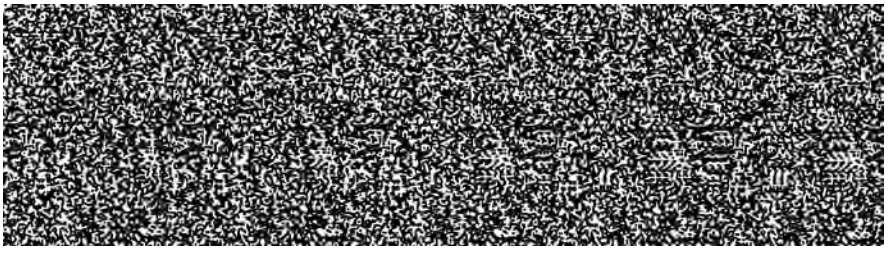


**FIGURA 29.41**
Estereograma generado por computadora.

## 29.6 Holografía

Acaso la ilustración más divertida de la interferencia sea el **holograma**, una placa fotográfica bidimensional producida con luz láser que te permite ver una reproducción fiel de una escena en tres dimensiones. El holograma lo inventó y nombró Dennis Gabor en 1947, 10 años antes de que se inventaran los láseres. En griego, *holo* significa "todo" y *grama* significa "mensaje" o "información". Por tanto, un holograma contiene todo el mensaje o la imagen completa. Con iluminación adecuada, la imagen es tan realista que en verdad puedes ver alrededor de las esquinas de los objetos en la imagen y ver los costados.

En la fotografía ordinaria, se usa una lente para formar una imagen. La luz reflejada en cada punto del objeto se dirige mediante la lente sólo hacia un punto correspondiente sobre la película o fotorreceptor. Sin embargo, en el caso de la holografía, no se usan lentes formadoras de imagen. En vez de ello, cada punto del objeto que se va a "fotografiar" refleja luz hacia *toda* la placa fotográfica, de modo que cada parte de la placa se expone con luz reflejada en cada región del objeto. Es importante que la luz usada para formar un holograma sea de una sola frecuencia y que todas las partes estén exactamente en fase: debe ser *coherente*. Si, por ejemplo, se usara luz blanca, las franjas de difracción para una frecuencia impedirían ver con claridad las de las demás frecuencias. Sólo un láser puede producir fácilmente tal luz. (En el Capítulo 30 se tratarán los láseres a detalle.) Los hologramas se hacen con luz láser, pero pueden verse con luz regular, como lo demuestra el holograma de tu tarjeta de crédito o de algunos tipos de dinero.

La luz es verdaderamente fascinante, en especial cuando se difracta en las franjas de interferencia de un holograma. Busca en Internet información detallada sobre los hologramas.

**pti**

- Los elementos ópticos holográficos que parecen flotar enfrente del parabrisas de una aeronave ayudan a los pilotos en la navegación. Lo mismo se presenta en algunos modelos de automóviles. Los médicos utilizan escaneos holográficos 3D para hacer mediciones sin cirugía invasiva. La lista de aplicaciones crece. ¡Espera en tu futuro una televisión holográfica!

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Principio de Huygens.** Cada punto en un frente de onda puede considerarse como la fuente de pequeñas ondas secundarias que se dispersan en todas direcciones con una rapidez igual a la rapidez de propagación de las ondas.

**Difracción.** El doblado de la luz que pasa cerca del borde de un objeto o a través de una rendija estrecha, que hace que la luz se disperse.

**Superposición.** El traslape y combinación de ondas.

**Interferencia.** El resultado de superponer diferentes ondas, por lo general con la misma longitud de onda. La interferencia constructiva resulta del reforzamiento de una cresta con otra cresta; la interferencia destructiva resulta de la cancelación de una cresta con un valle. La interferencia de longitudes de onda seleccionadas de la luz produce colores conocidos como *colores de interferencia*.

**Polarización.** El alineamiento de las vibraciones eléctricas transversales de radiación electromagnética. Se dice que tales ondas con vibraciones alineadas están *polarizadas*.

**Holograma.** Patrón de interferencia microscópica bidimensional que muestra imágenes ópticas tridimensionales.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 29.1 Principio de Huygens

1. De acuerdo con Huygens, ¿cómo se comporta cada punto sobre un frente de onda?
2. ¿Las ondas planas incidentes sobre una pequeña abertura en una barrera formarán un abanico en el otro lado o seguirán como ondas planas?

### 29.2 Difracción

3. ¿La difracción es más pronunciada a través de una abertura pequeña o a través de una abertura grande?
4. Para una abertura de un tamaño dado, ¿la difracción es más pronunciada para una longitud de onda más grande o para una longitud de onda más corta?
5. ¿Cuál se difracta con más facilidad alrededor de los edificios: las ondas de radio AM o las de FM? ¿Por qué?

### 29.3 Superposición e interferencia

6. ¿La interferencia se limita sólo a algunos tipos de ondas u ocurre para todo tipo de ondas?
7. ¿Qué aspecto de la luz demostró Thomas Young en su famoso experimento con luz?

### 29.4 Interferencia en películas delgadas

8. ¿Qué explican las bandas claras y oscuras que se producen cuando luz monocromática se refleja en una placa de vidrio que se encuentra encima de otra placa de vidrio?

9. ¿Qué se entiende cuando se dice que una superficie es *ópticamente plana*?
10. ¿Cuál es la causa de los anillos de Newton?
11. ¿Qué es lo que produce la iridiscencia?
12. ¿Qué es lo que produce el espectro de colores que se ve en las manchas de gasolina sobre una calle mojada? ¿Por qué estas manchas no se ven en una calle seca?
13. ¿Qué es lo que explica los diferentes colores de las pompas de jabón o de una capa de gasolina sobre agua?
14. ¿Por qué los colores de interferencia principalmente son cian, magenta y amarillo?

### 29.5 Polarización

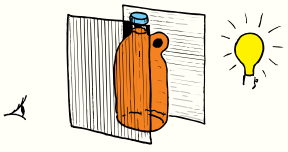
15. ¿Qué fenómeno distingue las ondas longitudinales de las ondas transversales?
16. ¿Cómo se compara la dirección de la polarización de la luz con la dirección de vibración del electrón que lo produce?
17. ¿Por qué la luz pasará a través de un par de Polaroid cuando los ejes estén alineados, pero no cuando los ejes estén en ángulo recto uno con respecto al otro?
18. ¿Cuánta luz ordinaria transmitirá un Polaroid ideal?
19. Cuando luz *ordinaria* incide en un ángulo oblicuo sobre el agua, ¿qué puedes decir acerca de la luz *reflejada*?
20. ¿El paralaje es evidente cuando cierras un ojo?
21. ¿El paralaje subyace a la profundidad percibida en las imágenes estereográficas?
22. ¿El observador percibiría profundidad si las imágenes proyectadas en la Figura 29.40 fuesen idénticas?
23. ¿Qué función tienen los filtros de polarización en la proyección 3D?

### 29.6 Holografía

24. ¿Cómo difiere un holograma de una fotografía convencional?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

25. Con una navaja de rasurar, corta una rendija en una tarjeta y observa una fuente de luz a través de ella. Puedes variar el tamaño de la abertura si doblas un poco la tarjeta. ¿Ves las franjas de interferencia? Intenta este experimento con dos rendijas poco espaciadas.
26. La próxima vez que estés en la tina, haz espuma y observa los colores de los destellos producidos por la luz que ilumina a cada pequeña burbuja. Observa que diferentes burbujas reflejan distintos colores, debido a los diferentes grosores de la película jabonosa. Si un amigo se baña contigo, compara los diferentes colores que cada uno ve reflejados en las mismas burbujas. Verás que son diferentes: ¡lo que ves depende de tu punto de vista!
27. Cuando uses gafas Polaroid, observa el destello de una superficie no metálica, como un camino o un cuerpo de agua. Inclina la cabeza de lado a lado y observa cómo la intensidad del destello cambia a medida que varías la magnitud del componente del vector eléctrico alineado con el eje de polarización de las gafas. Observa también la polarización de diferentes partes del cielo cuando sostengas las gafas en tu mano y las gires.
28. Coloca una fuente de luz blanca sobre una mesa frente a ti. Luego coloca una hoja de Polaroid enfrente de la fuente, una botella de jarabe de maíz enfrente de la hoja y una segunda hoja de Polaroid enfrente de la botella. Mira a través de las hojas Polaroid que forman un emparedado con el jarabe y verás colores espectaculares conforme giras una de las hojas.



## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

29. ¿Por qué la luz solar que ilumina la Tierra puede aproximarse mediante ondas planas, en tanto que la luz de una lámpara cercana no puede aproximarse de esta forma?
30. En tu entorno cotidiano, la difracción es mucho más evidente para las ondas sonoras que para las ondas luminosas. ¿Por qué esto es así?
31. ¿Por qué las ondas de radio se difractan alrededor de los edificios, pero las ondas de luz no lo hacen?
32. ¿En qué se parecen las franjas de interferencia de la luz a la intensidad variable que escuchas mientras caminas junto a un par de bocinas que emiten el mismo sonido?
33. ¿En cuánto deben diferir en distancia recorrida un par de rayos de luz provenientes de una fuente común para producir interferencia destructiva?
34. La luz ilumina dos rendijas delgadas poco espaciadas entre sí y producen un patrón de interferencia sobre una pantalla que está detrás de ellas. ¿Para cuál color de luz, amarillo o verde, la distancia entre las franjas será mayor?
35. Un arreglo de doble rendija produce franjas de interferencia para luz de sodio amarilla. ¿Debería usarse luz roja o luz azul para producir franjas con un menor espaciamiento?
36. Cuando la trayectoria reflejada en una superficie de una película delgada difiere en una longitud de onda completa de la trayectoria reflejada en la otra superficie y no ocurre un cambio de fase, ¿el resultado será interferencia destructiva o interferencia constructiva?
37. Cuando la trayectoria reflejada en una superficie de una película delgada difiere media longitud de onda de la trayectoria reflejada en la otra superficie y no ocurre un cambio de fase, ¿el resultado será interferencia destructiva o interferencia constructiva?
38. Supón que colocas una rejilla de difracción enfrente del lente de una cámara y tomas una fotografía del alumbrado público de una calle. ¿Qué esperarías ver en tu fotografía?
39. ¿Qué ocurre con la distancia entre las franjas de interferencia si la separación entre las dos rendijas aumenta?

40. ¿Por qué el experimento de Young es más efectivo con rendijas que con los orificios puntuales que usó primero?
41. ¿En cuál de éstos se forma color mediante refracción: pétalos de flor, arcoíris, pompas de jabón? ¿Mediante reflexión selectiva? ¿Mediante interferencia en películas delgadas?
42. Los colores de los pavos reales y los colibríes son el resultado no de pigmentos sino de crestas en las capas superficiales de sus plumas. ¿Mediante cuál principio físico estas crestas producen colores?
43. Las alas coloridas de muchas mariposas se deben a pigmentación, pero en otras, como en la mariposa Morpho, los colores no resultan de pigmentación alguna. Cuando el ala se ve desde diferentes ángulos, los colores cambian. ¿Cómo se producen estos colores?
44. ¿Por qué los colores iridiscentes vistos en algunas conchas marinas (como las conchas de abulón) cambian cuando las conchas se ven desde varias posiciones?
45. Cuando los platos no se enjuagan bien después de lavarse, diferentes colores se reflejan de sus superficies. Explica.
46. ¿Por qué los colores de interferencia son más evidentes en películas delgadas que en películas gruesas?
47. ¿La luz proveniente de dos estrellas muy cercanas producirá un patrón de interferencia? Explica.
48. Si observas los patrones de interferencia de una película delgada de aceite o gasolina sobre agua, verás que los colores forman anillos completos. ¿En qué son similares estos anillos a las líneas de igual elevación sobre un mapa de contorno?
49. Debido a la interferencia de ondas, una película de aceite sobre agua en la luz solar se ve amarilla para los observadores directamente arriba en un aeroplano. ¿Qué color de luz se transmite a través del aceite (que vería un buzo directamente bajo ella)?
50. Para el telescopio Hubble, ¿cuál luz (roja, verde, azul o ultravioleta) es mejor para ver detalles finos de objetos astronómicos distantes?
51. La luz polarizada es parte de la naturaleza, pero el sonido polarizado no lo es. ¿Por qué?
52. ¿Por qué un filtro Polaroid ideal transmitirá 50% de la luz no polarizada incidente?
53. ¿Por qué un filtro Polaroid ideal puede transmitir de cero a 100% de la luz polarizada incidente?
54. ¿Qué porcentaje de luz se transmite mediante dos Polaroid ideales, uno encima del otro, con sus ejes de polarización alineados? ¿Con sus ejes en ángulos rectos uno con respecto al otro?
55. ¿Cómo puedes determinar el eje de polarización para una sola hoja de Polaroid (en especial si estás a la orilla de un lago)?
56. ¿Por qué las gafas Polaroid reducen el destello, en tanto que las gafas no polarizadas simplemente recortan la cantidad total de luz que llega a los ojos?
57. Para retirar el destello de la luz proveniente de un suelo pulido, ¿el eje de un filtro Polaroid debería ser horizontal o vertical?
58. La mayor parte del destello proveniente de las superficies no metálicas es polarizado, con el eje de polarización paralelo al eje de la superficie reflectora. ¿Esperarías que el eje de polarización de unas gafas Polaroid fuera horizontal o vertical? ¿Por qué?
59. ¿De qué manera una sola hoja de película Polaroid puede servir para mostrar que el cielo está parcialmente polarizado? (Es muy interesante que, a diferencia de los seres humanos, las abejas y muchos insectos pueden discernir la luz polarizada y aprovechar esta habilidad para su navegación.)
60. ¿Por qué la holografía práctica tuvo que esperar la llegada del láser?
61. ¿Cuál de éstos es más importante para la holografía: interferencia, reflexión selectiva, refracción o todos ellos?

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

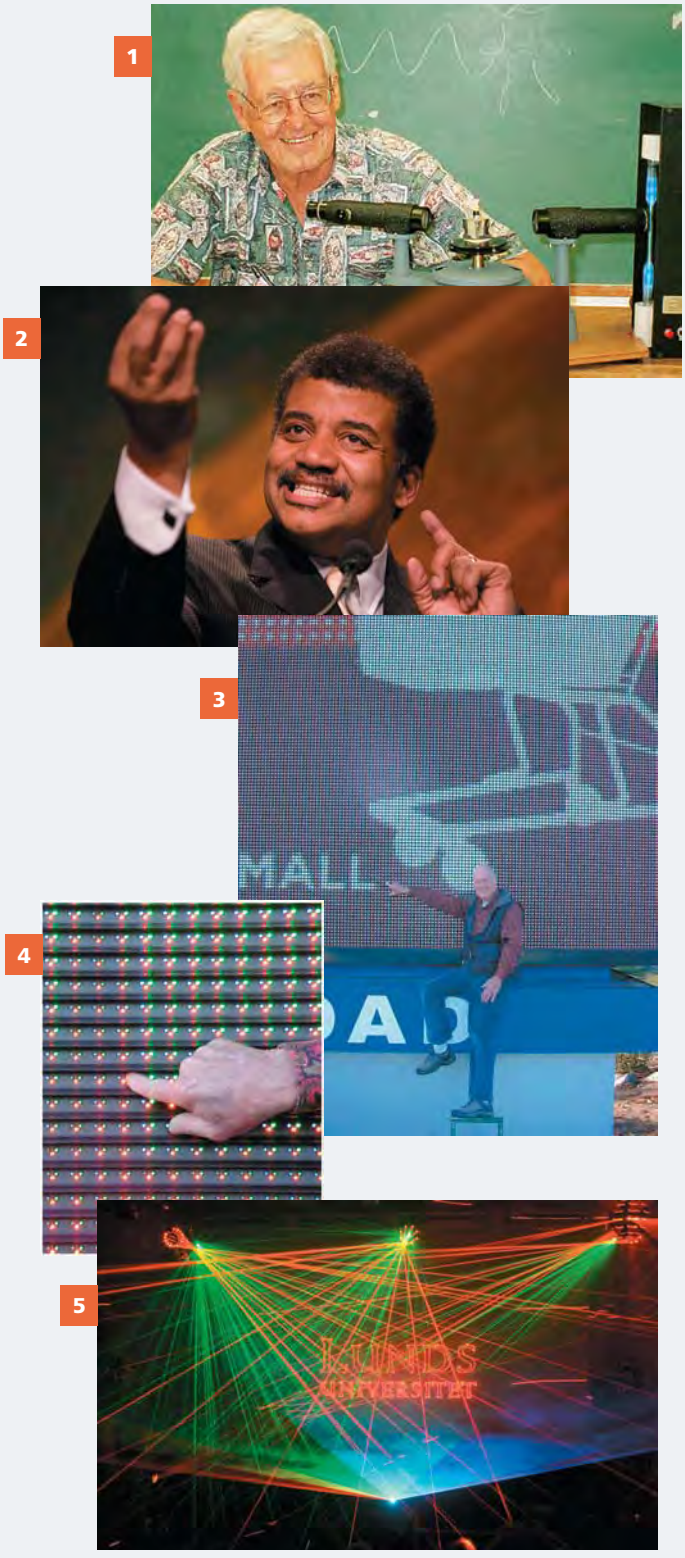
62. Cuando la luz blanca se difracta al pasar por una rendija delgada, como en la Figura 29.8b, diferentes componentes de colores se difractan en distintas cantidades de modo que un arcoíris de colores aparece en el borde del patrón. ¿Cuál color se difracta a través del ángulo más grande? ¿Cuál color a través del ángulo más pequeño?
63. ¿Cuál producirá franjas con un espaciado más ancho en un experimento de doble rendija: la luz roja o la luz violeta? (Deja que la Figura 29.18 guíe tu razonamiento.)
64. ¿Cuál producirá franjas con un espaciado más ancho: un experimento de doble rendija en aire o en agua? (Deja que la Figura 29.18 guíe tu razonamiento.)
65. Si la diferencia en la longitud de la trayectoria entre dos haces idénticos y coherentes es de dos longitudes de onda cuando llegan a una pantalla, ¿producirán una mancha oscura o una clara?
66. ¿Cuál producirá franjas de luz con un espaciamiento más ancho cuando pasen por una rejilla de difracción: la luz proveniente de un láser rojo o la luz proveniente de un láser verde?
67. Las pantallas digitales de los relojes y otros dispositivos suelen estar polarizadas. ¿Qué problema relacionado puede ocurrir cuando usas gafas Polaroid?
68. La luz no pasará a través de un par de hojas Polaroid cuando estén alineadas perpendicularmente. Sin embargo, si un tercer Polaroid se empareda entre las dos con su alineación a la mitad entre los alineamientos de las otras dos (esto es, con su eje formando un ángulo de 45° con cada uno de los otros dos ejes de alineamiento, como en la Figura 29.34), parte de la luz pasará a través de ellos. ¿Por qué?

30

CAPÍTULO 30

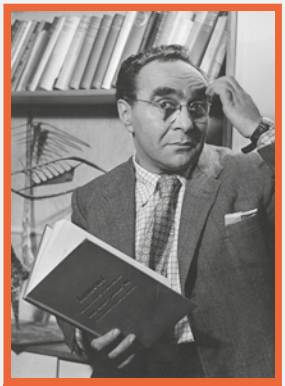
# Emisión de luz


30.1 Emisión de luz
30.2 Excitación
30.3 Espectros de emisión
30.4 Incandescencia
30.5 Espectros de absorción
30.6 Fluorescencia
30.7 Fosforescencia
30.8 Lámparas
30.9 Láseres

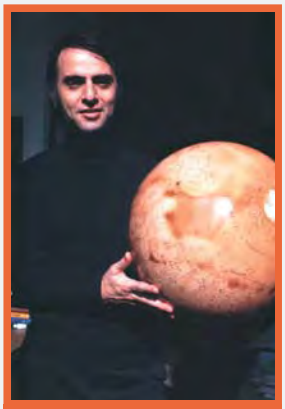




**1** George Curtis separa luz de una fuente de argón en las frecuencias que la componen con un espectroscopio. **2** Palabras sabias de Neil deGrasse Tyson: "La característica extraordinaria de las leyes de la física es que se aplican en todas partes, ya sea que elijas creer en ellas o no. Fuera de las leyes de la física, todo lo demás es opinión." **3** Evan Jones apunta hacia un uso extenso de los diodos emisores de luz (LED) en un tablero cerca de su universidad. **4** Los LED están dispuestos en series de los tres colores primarios aditivos: rojo, verde y azul. Todos los colores del arcoíris se activan cuando se encienden diversas combinaciones de LED. **5** Los estudiantes de física de la Universidad Lund de Suecia son agasajados con un espectáculo láser cada semestre.

Hace unos 40 años, Jacob Bronowski era un vocero mundial de la ciencia. Su libro y serie de televisión, *The Ascent of Man* (El ascenso del hombre), fueron fuente de inspiración para este autor y para millones de personas más. Luego llegó Carl Sagan, astrónomo, astrofísico, cosmólogo y autor de más de 20 libros, que inspiró todavía a más personas con su serie de televisión *Cosmos: A Personal Voyage* (Cosmos). Sagan enseñó bellamente que la ciencia es más importante como forma de razonamiento que como cuerpo de conocimiento.



Jacob Bronowski



Carl Sagan

Luego vino Neil deGrasse Tyson, quien a los 9 años de edad visitó el Planetario Hayden en la ciudad de Nueva York. Al igual que Sagan, quien había ido ahí de niño, Tyson quedó fascinado con la ciencia y particularmente intrigado con la astronomía. Su obsesión con la astronomía creció y, a los 15 años de edad compartió su emoción con otros al ofrecer conferencias públicas sobre astronomía. Después, cuando Tyson solicitó su ingreso a la Cornell University, su solicitud, que desbordaba pasión por el estudio y la investigación del universo, llamó la atención de Sagan, quien se puso en contacto con el joven Tyson y lo motivó. Aunque Tyson decidió asistir a Harvard, Sagan siguió siendo un buen mentor. Después de ocupar otros destacados puestos académicos, Tyson fue nombrado director del Planetario Hayden que lo había impresionado en su infancia. Ahí adquirió notoriedad por encabezar la degradación de Plutón al estatus de planeta enano, lo cual, sorprendentemente, fue un movimiento poco popular, con hordas de escolares que hicieron campaña para "Salvar a Plutón". Quizás Neil es mejor conocido por sus apariciones en la televisión PBS, en particular en *NOVA Science Now*, su secuela a la serie de televisión *Cosmos* de Sagan, y su programa de radio, *StarTalk Radio*. En el espíritu de Bronowski y Sagan, Tyson continúa informando a millones sobre las maravillas, la belleza y la importancia de la ciencia, centrado más en *cómo* pensar que en *qué* pensar.

Neil deGrasse Tyson

La respuesta de Tyson cuando se le pregunta sobre la vida diaria: "El problema, con frecuencia no descubierto sino hasta tarde en la vida, es que, cuando buscas cosas como el amor, el significado, la motivación, resulta que se encuentran detrás de un árbol o debajo de una roca. Las personas con más éxito en la vida reconocen que ellos crean su propio amor, construyen su propio significado, generan su propia motivación. En mi caso, mi motor son dos filosofías principales: saber más hoy del mundo de lo que sabía ayer. Y aliviar el sufrimiento de los demás. Te sorprendería saber cuán lejos te lleva eso." ¡Busca en Internet y conoce más de este carismático vocero de la ciencia!

Como astrofísico, para estudiar las estrellas Tyson se basó en la luz que emiten. Este capítulo examina la emisión de luz, que es tan fascinante para los astrónomos, los físicos y, espero, para ti también.

## 30.1 Emisión de luz

Si bombeas energía al interior de una antena metálica de tal forma que ésta haga que los electrones libres vibren unos cientos de miles de veces por segundo, se emite una onda de radio. Si los electrones libres pudieran vibrar en el orden de un trillón de veces por segundo, se emitiría una onda de luz visible. Pero la luz no se produce en las antenas metálicas, ni la producen de manera exclusiva antenas atómicas mediante oscilaciones de electrones en los átomos, como se estudió en capítulos anteriores. En este capítulo estudiarás la física de las fuentes de luz -de la *emisión* de luz.

Los detalles de la emisión de luz procedente de los átomos suponen transiciones de electrones de estados de energía más altos a estados más bajos en el interior del átomo. Este proceso de emisión puede entenderse en términos del conocido modelo planetario

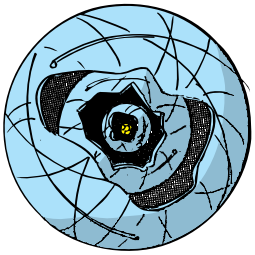


**FIGURA 30.1**
Vista simplificada de los electrones que orbitan en capas discretas alrededor del núcleo de un átomo.

del átomo que se estudió en el Capítulo 11. Así como cada elemento se caracteriza por el número de electrones que ocupan las capas que rodean su núcleo atómico, cada elemento posee su propio patrón característico de capas electrónicas, o estados energéticos. Estos estados se encuentran sólo con ciertas energías; se dice que son *discretos*. A estos estados discretos se les conoce como *estados cuánticos*, y regresarás a ellos con detalle en los siguientes dos capítulos. Por ahora, céntrate sólo en su importancia en la emisión de luz.

## 30.2 Excitación

Un electrón alejado del núcleo tiene mayor energía potencial eléctrica con respecto al núcleo que un electrón más cerca del núcleo. Se dice que el electrón más distante está en un estado de energía más alto o, lo que es lo mismo, en un nivel de energía más alto. En cierto sentido, esto es similar a la energía de una puerta de resorte o un martinete. Cuanto más se abra la puerta, mayor será su energía potencial de resorte; cuanto más alto se eleve el ariete del martinete, mayor será su energía potencial gravitacional.

Cuando un electrón de alguna forma se eleva a un nivel energético más alto, se dice que el átomo está *excitado*. Sin embargo, la posición más alta del electrón sólo es momentánea: al igual que la puerta de resorte abierta, pronto regresa a su estado energético más bajo. El átomo pierde su energía temporal adquirida cuando el electrón regresa a un nivel más bajo y emite energía radiante. El átomo experimenta los procesos de **excitación** y *desexcitación*.

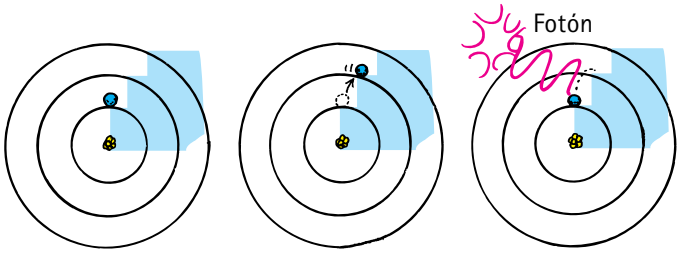



**FIGURA 30.2**
Cuando un electrón de un átomo se eleva a una órbita más alta, el átomo está excitado. Cuando el electrón regresa a su órbita original, el átomo se desexcita y emite un fotón de luz.

**SCREENCAST: Excitación atómica**

Así como cada elemento eléctricamente neutro tiene su propio número de electrones, cada elemento también tiene su propio conjunto característico de niveles de energía. Los electrones que descienden de niveles de energía más altos a niveles más bajos en un átomo excitado emiten con cada salto un pulso palpitante de radiación electromagnética llamada *fotón*, cuya frecuencia se relaciona con la transición de energía del salto. A este fotón se le considera como un corpúsculo localizado de energía pura, una "partícula" de luz, que se expulsa del átomo. La frecuencia del fotón es directamente proporcional a su energía. En notación abreviada,

$$E \sim f$$

Cuando se introduce la constante de proporcionalidad $h$, esto se convierte en la ecuación exacta

$$E = hf$$

donde $h$ es la constante de Planck (en el siguiente capítulo estudiarás más de esto).

Un fotón de un haz de luz roja, por ejemplo, transporta una cantidad de energía que corresponde a su frecuencia. Otro fotón con el doble de frecuencia tiene el doble de energía y se encuentra en la parte ultravioleta del espectro. Si muchos átomos de un material se excitan, se emiten muchos fotones con muchas frecuencias que corresponden

Todo en la naturaleza está conectado. Incluso las islas están conectadas por debajo.

a los muchos diferentes niveles excitados. Estas frecuencias corresponden a colores característicos de luz proveniente de cada elemento químico.

La luz emitida en los tubos de vidrio de los anuncios publicitarios es una consecuencia conocida de la excitación. Los diferentes colores del anuncio corresponden a la excitación de diferentes gases, aunque es común referirse a cualquiera de ellos como "neón". Sólo la luz roja es la del neón. En los extremos del tubo de vidrio que contiene el gas neón hay electrodos. Los electrones son desprendidos de estos electrodos y empujados de ida y vuelta a grandes rapideces por un alto voltaje CA. Millones de electrones con alta rapidez vibran de ida y vuelta dentro del tubo de vidrio y chocan con millones de átomos blanco; esto hace que los electrones en sus orbitales se eleven hacia niveles de energía más altos gracias a una cantidad de energía igual a la energía cinética perdida por el electrón que bombardea. Esta energía luego se irradia como la característica luz roja del neón cuando los electrones caen de vuelta a sus órbitas estables (hacia sus estados base). El proceso ocurre y vuelve a ocurrir muchas veces, ya que los átomos de neón experimentan de manera continua un ciclo de excitación y desexcitación. El resultado global de este proceso es la transformación de la energía eléctrica en energía radiante.

Los colores de varias flamas se deben a la excitación. Diferentes átomos de la flama emiten colores característicos del espaciamiento de sus niveles de energía. La sal de mesa común colocada en una flama, por ejemplo, produce el amarillo característico del sodio. Todo elemento, excitado en una flama u otra cosa, emite su propio color, o colores, característicos.

Las lámparas del alumbrado público constituyen otro ejemplo. Las calles de la ciudad se iluminan con luz emitida por gases como el vapor de mercurio. La luz proveniente de estas lámparas es rica en azules y violetas y, por tanto, es un "blanco" diferente al de la luz de las antiguas lámparas incandescentes. Casi todas las lámparas de las calles utilizan el brillo del gas sodio, que consume menos energía. Las lámparas de vapor de sodio a baja presión tienen un tinte anaranjado-amarillo. Pregunta a tu instructor si tiene un prisma o rejilla de difracción de repuesto que te pueda prestar. Mira a través del prisma o la rejilla la luz de las lámparas de la calle y observa lo discreto de los colores, lo cual indica lo discreto de los niveles atómicos. Observa los diferentes colores de las lámparas de mercurio y de sodio.

La excitación se ilustra en las auroras boreales y australes. Partículas cargadas con gran rapidez que se originan en el viento solar golpean los átomos y las moléculas en la atmósfera superior. Emiten luz exactamente como ocurre en un tubo de neón. Los diferentes colores de la aurora corresponden a la excitación de diferentes gases: los átomos de oxígeno producen un color verdoso-blanco, las moléculas de nitrógeno producen rojo-violeta y los iones de nitrógeno producen azul-violeta. Las emisiones aurorales no se restringen a la luz visible; también incluyen radiación infrarroja, ultravioleta y de rayos X.

Sólo la mecánica cuántica permite describir con exactitud el proceso excitación/desexcitación. Si intentas ver el proceso en términos de física clásica, te toparás con contradicciones. De manera clásica, una carga eléctrica que acelera produce radiación electromagnética. ¿Esto explica que los átomos excitados emitan luz? Un electrón sí acelera cuando transita de un nivel de energía más alto a uno más bajo. Tal como los planetas interiores del sistema solar tienen mayores rapideces orbitales que los que se encuentran en órbitas más externas, los electrones en las órbitas más internas del átomo tienen mayores rapideces. Un electrón gana rapidez cuando cae a niveles de energía más bajos. Bien, -¡el electrón que acelera radia un fotón! Pero no tan bien -el electrón experimenta de manera continua aceleración (aceleración centrípeta) en cualquier órbita, ya sea que cambie o no de niveles de energía. De acuerdo con la física clásica, debería radiar energía de manera continua. Pero no lo hace. Todos los intentos por explicar la emisión de luz de un átomo excitado en términos de un modelo clásico han sido infructuosos. Sólo se dirá que la luz se emite cuando un electrón de un átomo realiza un "salto cuántico" de un nivel de energía más alto a uno más bajo y que la energía y la frecuencia del fotón emitido se describen mediante $E = hf$.

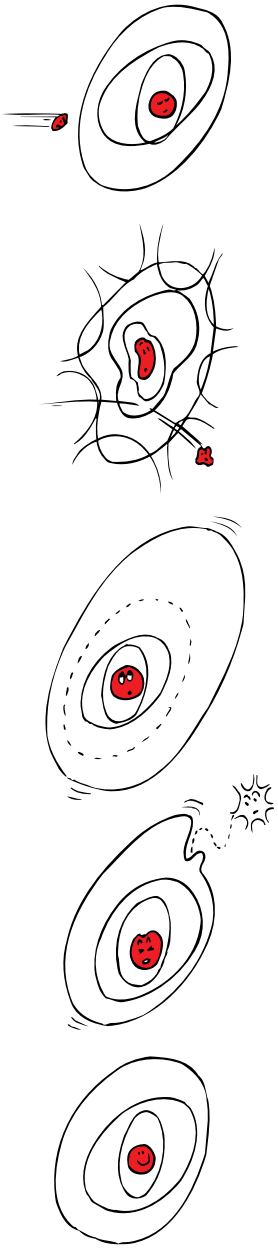


**FIGURE 30.3**
Excitación y desexcitación.

Excitar un átomo es como intentar sacar a patadas una pelota de una zanja. Con muchas patadas cortas no podrás sacarla, porque la bola seguirá cayendo una y otra vez. Una patada con la cantidad correcta de energía es suficiente para sacar la bola de la zanja. Lo mismo ocurre con la excitación de los átomos.

**PUNTO DE CONTROL**

**Supón que un amigo sugiere que, para un excelente funcionamiento, los átomos de neón gaseoso en un tubo de neón deben sustituirse en forma periódica con átomos frescos, porque la energía de los átomos tiende a agotarse con la excitación continua, lo que produce luz cada vez más tenue. ¿Qué dices de esto?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Los átomos de neón no liberan energía alguna que no les sea cedida por la corriente eléctrica en el tubo y, por tanto, no se "agotan". Cualquier átomo puede excitarse y desexcitarse sin límite. Si la luz, de hecho, se vuelve cada vez más tenue, es probable que se deba a una fuga. Por lo demás, no hay ventaja alguna en cambiar el gas en el tubo, porque un átomo "fresco" es indistinguible del "agotado". Ambos son atemporales y más viejos que el sistema solar.

## 30.3 Espectros de emisión

**SCREENCAST: Espectros atómicos**

Cada elemento tiene su propio patrón característico de niveles de energía electrónica y, por tanto, emite luz con su propio patrón característico de frecuencias, es decir, su **espectro de emisión**, cuando se excita. Este patrón puede observarse cuando la luz pasa a través de un prisma o, mejor aún, cuando pasa por primera vez por una rendija delgada y luego se enfoca a través de un prisma sobre una pantalla de visualización. Al arreglo de una rendija, una lente de enfoque y un prisma (o rejilla de difracción) se le llama **espectroscopio**, uno de los instrumentos más útiles de la ciencia moderna (Figura 30.4).

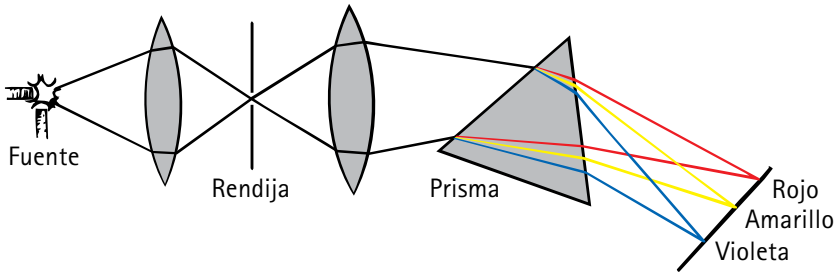



**FIGURA 30.4**
Un espectroscopio simple. Las imágenes de la rendija iluminada se proyectan sobre una pantalla y conforman un patrón de líneas. El patrón espectral es característico de la luz utilizada para iluminar la rendija.

Cada color componente se enfoca en una posición determinada, de acuerdo con su frecuencia, y forma una imagen de la rendija sobre la pantalla, película fotográfica o detector adecuado. Las imágenes de la rendija con diferentes colores se llaman *líneas espectrales*. En la Figura 30.5 se muestran algunos patrones espectrales típicos. Es habitual referirse a los colores en términos de sus longitudes de onda y no de sus frecuencias. Una frecuencia determinada corresponde a una longitud de onda determinada.[1]

Si la luz cedida por una lámpara de vapor de sodio se analiza en un espectroscopio, predomina una sola línea amarilla: una sola imagen de la rendija. Si se reduce el ancho de la rendija, se descubre que esta línea en realidad está compuesta de dos líneas muy cercanas. Estas líneas corresponden a las dos frecuencias de luz predominantes emitidas por átomos de sodio excitados. El resto del espectro parece negro. (En realidad, hay muchas otras líneas, con frecuencia demasiado tenues como para verse a simple vista.) Lo mismo ocurre con todos los vapores que brillan. La luz de una lámpara de vapor de mercurio muestra un par de líneas amarillas brillantes juntas (pero en diferentes

[1]Recuerda del Capítulo 19 que $v = f\lambda$ donde $v$ es la rapidez de onda, $f$ es la frecuencia de la onda y $\lambda$ (lambda) es la longitud de onda. Para la luz, $v$ es la constante $c$, por lo que, a partir de $c = f\lambda$ se ve la relación entre frecuencia y longitud de onda, a saber, $f = \frac{c}{\lambda}$ y $\lambda = \frac{c}{f}$.

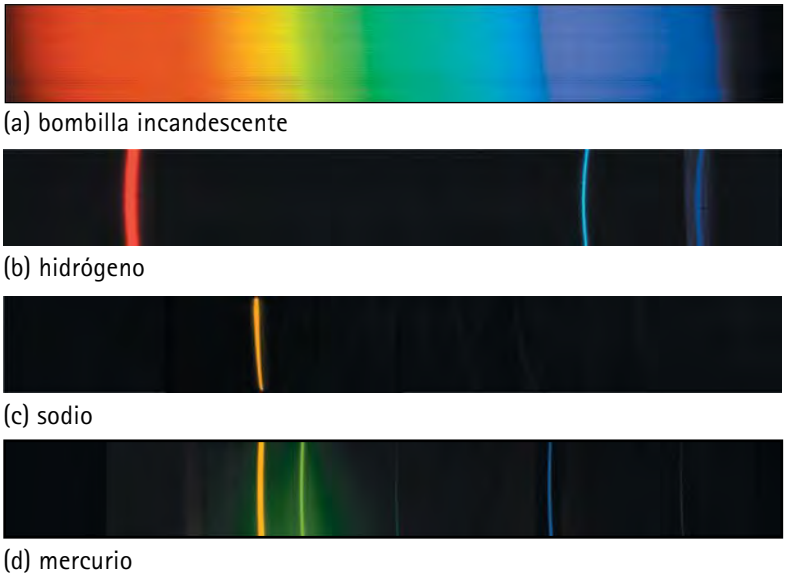



**FIGURE 30.5**
(a) Una bombilla incandescente tiene un espectro continuo. Cada uno de los tres elementos (b) hidrógeno, (c) sodio y (d) mercurio tienen un espectro de líneas diferente.

posiciones a las del sodio), una línea verde muy intensa y varias líneas azul y violeta. Un tubo de neón produce un patrón de líneas más complicado. Se observa que la luz emitida por cada elemento en la fase de vapor produce su propio patrón de líneas característico. Estas líneas corresponden a las transiciones electrónicas entre niveles de energía atómicos y son tan características de cada elemento como las huellas digitales de una persona. Por tanto, el espectroscopio se usa de manera generalizada en análisis químicos.

La próxima vez que veas evidencia de excitación atómica, acaso la flama verde producida cuando un trozo de cobre se coloca en el fuego, haz bizco y ve si puedes imaginar a los electrones saltando de un nivel de energía a otro en un patrón característico del átomo que se esté excitando, un patrón que muestra un color único para dicho átomo. ¡Eso es lo que ocurre!

**pti**

- Debido a que cada elemento químico tiene su propio conjunto *único* de niveles de energía, cada elemento también tiene su propio *patrón distintivo* de líneas espectrales de absorción (y emisión): la *"huella digital" espectral* que los astrónomos usan para identificar varios elementos químicos en los objetos astronómicos.

**PUNTO DE CONTROL**

**Los patrones espectrales no son manchas deformes de luz sino que, más bien, consisten en líneas rectas finas y distintivas. ¿Por qué esto es así?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Las líneas espectrales son tan solo imágenes de la rendija, que en sí misma es una delgada abertura recta por la cual se admite luz antes de dispersarse por el prisma (o la rejilla de difracción). Cuando la rendija se ajusta para hacer más estrecha su abertura, pueden descomponerse líneas menos espaciadas (distinguibles entre sí). Una rendija más ancha admite más luz, lo que permite la detección más sencilla de una energía radiante más tenue. Pero el ancho es a costa de la resolución cuando las líneas con espacios más angostos se confunden entre sí.

## 30.4 Incandescencia

La luz que se produce como resultado de la alta temperatura tiene la propiedad de la **incandescencia** (de la palabra latina que significa "calentar"). Puede tener un tinte rojizo, como el del elemento calefactor de un tostador, o un tinte azulado, como el de una estrella particularmente caliente. O puede ser blanco, como el de una lámpara incandescente familiar. Lo que separa a la luz incandescente de la luz de un tubo de neón

**SCREENCAST:** Emisión de luz

**FIGURA 30.6**
Una campana sola tañe con un sonido que tiene una frecuencia clara y nítida, en tanto que el sonido que emana de una caja de campanas apiñonadas es discordante. Lo mismo ocurre con la diferencia entre la luz emitida por los átomos en el estado gaseoso y la luz proveniente de los átomos en el estado sólido.

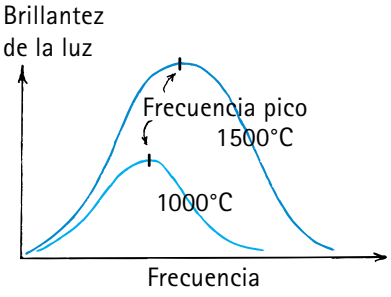



**FIGURA 30.7**
Curvas de radiación para un sólido incandescente.

o una lámpara de vapor de mercurio es que contiene un infinito número de frecuencias, que se dispersan fácilmente a través del espectro. ¿Esto significa que un número infinito de niveles de energía caracteriza a los átomos de tungsteno que constituyen el filamento de la lámpara incandescente? La respuesta es no; si el filamento se vaporizara y luego excitara, el gas tungsteno emitiría luz con un número finito de frecuencias y produciría un color azulado global. La luz emitida por los átomos alejados entre sí en la fase gaseosa es muy diferente de la luz emitida por los mismos átomos empacados de manera compacta en la fase sólida. Esto es similar a las diferencias entre el sonido proveniente de una campana que tañe aislada y el de una caja atiborrada de campanas que tañen (Figura 30.6). En un gas, los átomos están separados. Los electrones experimentan transiciones entre los niveles de energía en el interior del átomo sin que los afecte la presencia de los átomos vecinos. Pero cuando los átomos están compactados, como en un sólido, los electrones de las órbitas exteriores realizan transiciones no sólo dentro de los niveles energéticos de sus átomos "padres", sino también entre los niveles de los átomos vecinos. Estos rebotan sobre dimensiones mayores a las de un solo átomo, lo que resulta en una variedad infinita de transiciones, de ahí el número infinito de frecuencias de energía radiante.

Como podría esperarse, la luz incandescente depende de la temperatura porque es una forma de radiación térmica. En la Figura 30.7. se muestra una gráfica de la energía radiada sobre un amplio rango de frecuencias para dos temperaturas diferentes. (Recuerda que la curva de radiación para la luz solar se estudió en el Capítulo 27, y la radiación de cuerpo negro se abordó en el Capítulo 16.) A medida que el sólido se calienta más, ocurren más transiciones de energía alta y se emite radiación con una frecuencia más alta. La curva abarca un espectro continuo. En la parte más brillante del espectro, la frecuencia predominante de la radiación emitida, la *frecuencia pico*, es directamente proporcional a la temperatura absoluta del emisor:

$$f \sim T$$

Se usa la barra sobre la $f$ para indicar la frecuencia pico, porque desde la fuente incandescente se emiten radiaciones de muchas frecuencias. Si la temperatura de un objeto (en kelvins) se duplica, la frecuencia pico de la radiación emitida se duplica. Las ondas electromagnéticas de luz violeta tienen casi el doble de frecuencia que las ondas de luz roja. Por tanto, una estrella caliente violeta tiene casi el doble de temperatura superficial que una estrella caliente roja.[2] La temperatura de los cuerpos incandescentes, sean estrellas o los interiores de altos hornos, puede determinarse al medir la frecuencia pico (o color) de la energía radiante que emiten.

**PUNTO DE CONTROL**

**De acuerdo con las curvas de radiación que se muestran en la Figura 30.7, ¿cuál emite la mayor frecuencia promedio de energía radiante: la fuente de 1,000°C o la fuente de 1,500°C? ¿Cuál emite más energía radiante?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

La fuente radiante de 1,500°C emite la mayor frecuencia promedio, como se aprecia por la extensión de la curva hacia la derecha. La fuente de 1,500°C es más brillante y también emite más energía radiante, como se aprecia por su mayor desplazamiento vertical.

[2]Si estudias este tema más a fondo, entonces, como se mencionó en la nota al pie de página 3 del Capítulo 16, descubrirás que la tasa de tiempo a la que un objeto irradia energía (la potencia radiada) es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura Kelvin. De modo que una duplicación de temperatura corresponde a una duplicación de la frecuencia de energía radiante, pero a un aumento de 16 veces de la tasa de emisión de energía radiante.

## 30.5 Espectros de absorción

Cuando se ve luz blanca de una fuente incandescente con un espectroscopio, se observa un espectro continuo sobre todos los colores del arcoíris. Sin embargo, si un gas se coloca entre la fuente y el espectroscopio, una inspección cuidadosa mostrará que el espectro no es muy continuo. Este es un **espectro de absorción**, y hay líneas oscuras distribuidas por todo el espectro; estas líneas oscuras contra un fondo de muchos colores son como las líneas de emisión invertidas. Son *líneas de absorción*.

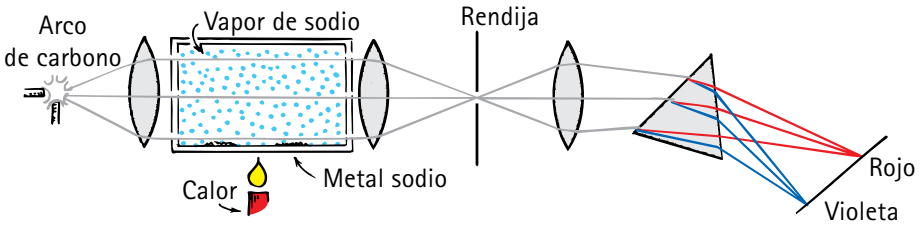



**FIGURA 30.8**
Arreglo experimental que muestra el espectro de absorción de un gas.

Los átomos absorben luz y emiten luz. Un átomo absorberá con más intensidad la luz que tenga las frecuencias para las cuales está sintonizado -algunas de las mismas frecuencias que emite. Cuando un haz de luz blanca pasa a través de un gas, los átomos del gas absorben luz con frecuencias seleccionadas de dicho haz. Esta luz absorbida vuelve a radiarse, pero en *todas* direcciones y no sólo en la dirección del haz incidente. Cuando la luz restante del haz se dispersa en un espectro, las frecuencias que fueron absorbidas aparecen como líneas oscuras en el espectro continuo. Las posiciones de estas líneas oscuras corresponden exactamente a las posiciones de las líneas en un espectro de emisión del mismo gas (Figura 30.9).

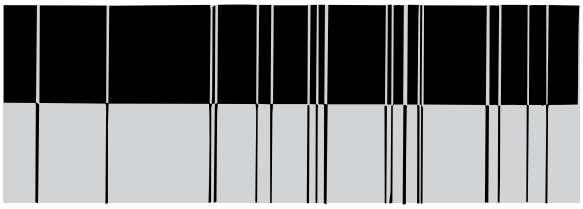


**FIGURA 30.9**
Espectros de emisión y de absorción.

Si bien el Sol es una fuente de luz incandescente, el espectro que produce, cuando se examina de cerca, no es continuo. Hay muchas líneas de absorción, llamadas *líneas de Fraunhofer*, en honor del óptico y físico bávaro Joseph von Fraunhofer, quien las observó primero y las mapeó con exactitud. Hay líneas similares en los espectros producidos por las estrellas. Estas líneas indican que el Sol y las estrellas están cada una rodeadas por una atmósfera de gases más fríos que absorben parte de la luz proveniente del cuerpo principal. El análisis de estas líneas revela la composición química de las atmósferas de dichas fuentes. Con base en estos análisis se descubre que los elementos estelares son los mismos elementos que existen sobre la Tierra. Un dato interesante extra es que, en 1868, un análisis espectroscópico de la luz solar mostró unas líneas espectrales diferentes de cualquiera conocida sobre la Tierra. Estas líneas identificaron un nuevo elemento, que se denominó *helio*, en honor de Helios, el dios griego del Sol. El helio se descubrió en el Sol antes de descubrirse en la Tierra. ¡Qué tal!

Es posible determinar la rapidez de las estrellas si se estudian los espectros que emiten. Así como una fuente sonora en movimiento produce un corrimiento Doppler en su tono (consulta el Capítulo 19), una fuente luminosa en movimiento produce un corrimiento Doppler en su frecuencia luminosa. La frecuencia (¡no la rapidez!) de la luz emitida por una fuente que se aproxima es más alta, en tanto que la frecuencia de la luz proveniente de una fuente que se aleja es menor, que la frecuencia de la luz proveniente de una fuente estacionaria. Las correspondientes líneas espectrales se desplazan hacia el extremo rojo del espectro en el caso de las fuentes que retroceden. Casi todas las galaxias muestran un corrimiento al rojo en sus espectros, evidencia de que el universo se expande.

En el Capítulo 31, verás cómo los espectros de los elementos permiten determinar la estructura atómica.

La galaxia Andrómeda se aproxima al sistema solar, y emite luz hacia la Tierra que se corre al azul.

**PUNTO DE CONTROL**

**Distingue entre espectros de emisión, espectros continuos y espectros de absorción.**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Los espectros de emisión los producen gases delgados en los que los átomos no experimentan muchas colisiones. Los espectros continuos resultan cuando los átomos chocan en forma continua, razón por la cual sólidos, líquidos y gases densos emiten luz en todas las frecuencias visibles cuando se calientan. Los espectros de absorción ocurren cuando la luz pasa a través de un gas diluido y los átomos del gas absorben en frecuencias características. Puesto que es poco probable que la luz reemitida se emita en la misma dirección que los fotones absorbidos, en el espectro aparecen líneas oscuras (ausencia de luz).

## 30.6 Fluorescencia

La agitación térmica y el bombardeo con partículas, como los electrones de alta rapidez, no son los únicos medios para impartir energía de excitación a un átomo. Un átomo puede excitarse cuando absorbe un fotón de luz. A partir de la relación $E = hf$, se observa que la luz de alta frecuencia, como la ultravioleta, que se encuentra más allá del espectro visible, suministra más energía por fotón que la luz de frecuencia más baja. Muchas sustancias experimentan excitación cuando se iluminan con luz ultravioleta.

Muchos materiales que se excitan con luz ultravioleta emiten luz visible en la desexcitación. La acción de estos materiales se denomina **fluorescencia**. En estos materiales, un fotón de luz ultravioleta excita al átomo y eleva un electrón a un estado de energía más alto. En este salto cuántico hacia arriba, es probable que el átomo realice un salto sobre varios estados energéticos intermedios. De modo que, cuando el átomo se desexcita, puede dar saltos más pequeños y emitir fotones con menos energía.

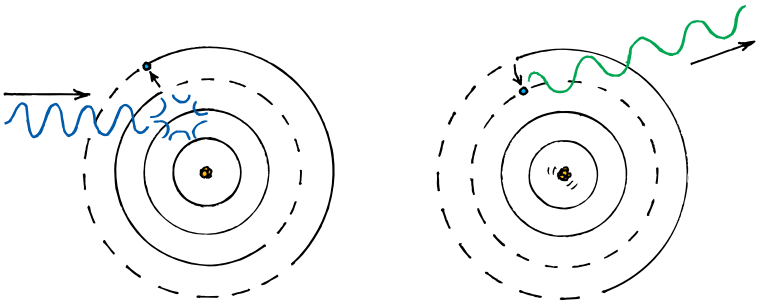


**FIGURA 30.10**
En la fluorescencia, la energía del fotón ultravioleta absorbido eleva al electrón de un átomo a un estado de energía más alto. Cuando después el electrón regresa a un estado intermedio, el fotón emitido es menos energético y, por tanto, tiene menor frecuencia que el fotón ultravioleta.

Este proceso de excitación y desexcitación es como subir un tramo de escaleras de un solo salto y luego descender uno o dos peldaños a la vez en lugar de bajarlos todos de un solo salto. Se emiten fotones con frecuencias más bajas. Por tanto, la luz ultravioleta que alumbra sobre el material hace que brille todo rojo, amarillo o de cualquier color que sea característico del material. Se utilizan colorantes fluorescentes en pinturas

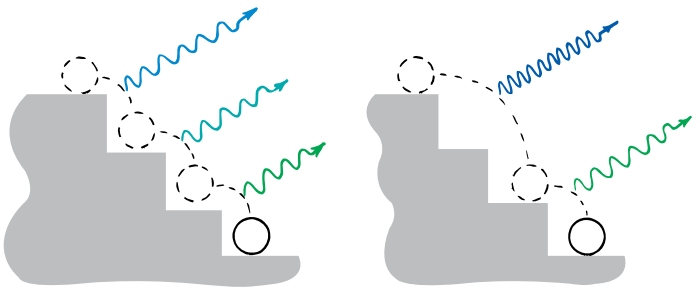


**FIGURA 30.11**
Un átomo excitado puede desexcitarse en varias combinaciones de saltos.

y telas para hacerlos brillar cuando son bombardeados con fotones ultravioleta de la luz solar. Pueden ser espectaculares cuando se iluminan con una lámpara ultravioleta.

En los detergentes de los que se afirma que limpian tu ropa y la dejan "más blanca que el blanco" se aplica el principio de la fluorescencia. Dichos detergentes contienen un tinte fluorescente que convierte la luz ultravioleta de la luz solar en luz visible azul, de modo que la ropa lavada de esta forma parece reflejar más luz azul de la que reflejaría de otro modo. Esto hace que la ropa parezca más blanca.[3]

La próxima vez que visites un museo de ciencias naturales, dirígete a la sección de geología y echa un vistazo a los minerales iluminados con luz ultravioleta (Figura 30.13). Observarás que diferentes minerales irradian varios colores. Esto es de esperarse porque los diferentes minerales están compuestos de elementos diversos, los cuales, a su vez, tienen varios conjuntos de niveles electrónicos de energía. Observar los minerales radiantes es una hermosa experiencia visual, que es todavía más fascinante si se integra con tu conocimiento de los aconteceres submicroscópicos de la naturaleza. Fotones ultravioleta de alta energía golpean los minerales, lo que produce la excitación de los átomos en la estructura mineral. Las frecuencias de la luz que ves corresponden a los pequeños espaciamientos de los niveles de energía conforme la energía baja en cascada. Todo átomo excitado emite sus frecuencias características, y no hay dos minerales diferentes que emitan luz de exactamente el mismo color. La belleza está tanto en el ojo como en la mente del observador.

**FIGURA 30.12**
Crayones fluorescentes de varios colores bajo luz ultravioleta.

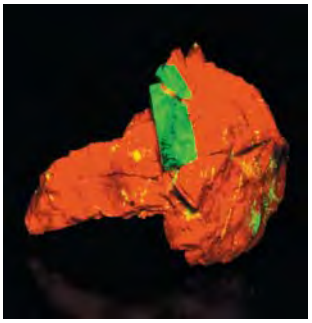


**FIGURA 30.13**
La roca contiene los minerales fluorescentes calcita y willemita, los cuales, bajo luz ultravioleta, se ven claramente como rojo y verde, de manera respectiva.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Por qué sería imposible que un material fluorescente emita luz ultravioleta cuando se ilumina con luz infrarroja?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La salida de energía del fotón sería mayor que la energía de entrada del fotón, lo que violaría la ley de conservación de la energía.

## 30.7 Fosforescencia

Cuando se excitan, ciertos cristales y algunas moléculas orgánicas grandes, permanecen en un estado de excitación durante un periodo prolongado de tiempo. A diferencia de lo que ocurre en los materiales fluorescentes, sus electrones se elevan a niveles de energía más altos y quedan "atorados". En consecuencia, hay un retraso temporal entre los procesos de excitación y desexcitación. Los materiales que presentan esta propiedad particular se dice que tienen **fosforescencia**.

El elemento fósforo se utiliza en varios materiales luminosos, incluso en los cepillos de dientes, que se hacen para brillar en la oscuridad. Los átomos o moléculas de estos materiales se excitan con luz visible incidente. En lugar de desexcitarse de inmediato, como lo hacen los materiales fluorescentes, muchos de los átomos permanecen en un *estado metaestable*, un estado prolongado de excitación, en ocasiones hasta durante horas, aunque casi todos se desexcitan en forma rápida. Si la fuente de excitación se retira (por ejemplo, si las luces se apagan), permanece una postluminiscencia al tiempo que millones de átomos experimentan una desexcitación gradual espontánea. La postluminiscencia de algunos interruptores de luz fosforescentes en la casa puede durar más de una hora. Lo mismo sucede con los diales de los relojes luminosos, que se excitan con luz visible. Algunos diales de relojes antiguos brillan indefinidamente en la oscuridad, no debido a una gran demora temporal entre excitación y desexcitación, sino porque contienen radio u algún otro material radiactivo que de manera continua suministra energía para mantener en marcha el proceso de

**pti**

- Para hacer más difícil la falsificación, muchos gobiernos, incluido el gobierno estadounidense, utilizan la fluorescencia. Para observarlo por ti mismo, expón a luz UV un billete estadounidense del nuevo diseño. Cerca del extremo, aparecerá una línea que no puede verse con luz visible. Este hilo fluorescente puede verse en el anverso y el reverso del billete.

[3]Es muy interesante que los mismos detergentes comercializados en México y algunos otros países se adapten para ofrecer un efecto más rosa y cálido.

excitación. Tales diales ya no son comunes debido al daño potencial del material radiactivo para el usuario, en especial si está en un reloj de pulsera o de bolsillo.[4]

Muchos seres vivos (desde bacterias hasta luciérnagas y animales más grandes, como las medusas) excitan químicamente las moléculas de sus cuerpos que emiten luz. Se dice que tales criaturas vivas son *bioluminiscentes*. Bajo ciertas condiciones, algunos peces se vuelven luminiscentes cuando nadan, pero permanecen oscuros cuando están estacionarios. Bancos de estos peces quedan inmóviles y no se ven, pero cuando se les perturba, salen disparados hacia las profundidades con luz súbita, lo que crea una especie de fuegos artificiales en lo profundo del mar. El mecanismo de bioluminiscencia no se comprende bien y se investiga en la actualidad.

**CHECK POINT**

**Distingue entre fluorescencia y fosforescencia en términos de tiempo.**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Los materiales fluorescentes emiten luz en forma inmediata después de ser excitados. En el caso de los materiales fosforescentes hay un retraso en el tiempo entre excitación y desexcitación.

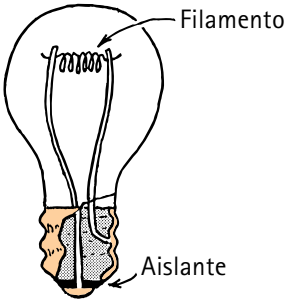



**FIGURA 30.14**
Versión simplificada de una bombilla incandescente. Una fuente de voltaje proporciona aumentos de energía a los electrones del filamento de alta resistencia. Una porción relativamente pequeña de esta energía se convierte en luz.

**pti**

- Aunque la bombilla incandescente no la inventó Thomas Edison, él fue el primero en fabricar una que superaba a otras versiones de la época e inventó todo un sistema integrado de iluminación eléctrica.

## 30.8 Lámparas

### Lámpara incandescente

La lámpara incandescente común consiste en una envoltura de vidrio con un filamento de alambre de tungsteno en su interior, a través del cual pasa una corriente eléctrica (FigurA 30.14). La corriente suele calentar el filamento a 2,000 K o 3,000 K, muy por debajo del punto de fusión del tungsteno, que es de 3,695 K. El filamento caliente emite un espectro continuo, principalmente en el infrarrojo, y la luz visible es la parte más pequeña y útil. La envoltura de vidrio evita que el oxígeno del aire llegue al filamento caliente, que de otro modo se destruiría por una rápida oxidación. Con el tiempo, el filamento falla de cualquier forma debido a su gradual evaporación, lo que a la larga conduce a que se rompa el filamento y a que la bombilla "se queme."

Por lo general, el argón es el gas que está en el interior de la envoltura. Si una pequeña cantidad de un elemento halógeno, como el yodo, se agrega al interior, la evaporación del tungsteno se frena y la bombilla dura más tiempo. Para que el halógeno actúe es indispensable que toda la bombilla esté muy caliente (¡no toques una lámpara de halógeno que brilla!), por lo que la bombilla se hace más pequeña y generalmente se encierra en cuarzo resistente al calor. La lámpara de halógeno también puede ser un poco más eficiente que la lámpara incandescente convencional.

La eficiencia de las bombillas incandescentes como emisoras de luz visible suele ser menor al 10%. En consecuencia, se están sustituyendo de manera gradual con lámparas que convierten un mayor porcentaje de la energía eléctrica en luz visible.

### Lámpara fluorescente

La lámpara fluorescente común consiste en un tubo de vidrio cilíndrico con electrodos en cada extremo (Figura 30.15). En la lámpara, como en el tubo de un letrero de neón,

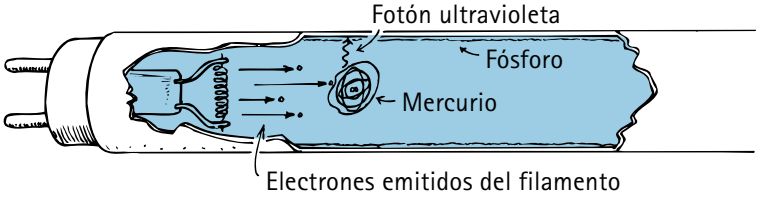



**FIGURA 30.15**
Un tubo fluorescente. Un gas en el tubo, excitado por una corriente eléctrica alterna, emite luz ultravioleta (UV). La luz UV, a su vez, excita los fósforos en la superficie interior del tubo de vidrio, que emite luz blanca.

[4]Sin embargo, una forma radiactiva de hidrógeno llamada *tritio* puede servir para que los diales de los relojes se iluminen de un modo inofensivo. Esto se debe a que su radiación no tiene suficiente energía como para penetrar el metal o el plástico de la caja del reloj.

los electrones se desprenden de los electrodos y se fuerzan a vibrar a grandes rapideces dentro del tubo mediante el voltaje CA. El tubo está lleno con vapor de mercurio a muy baja presión, que se agrega al argón. Los átomos de mercurio se excitan por el impacto de los electrones de gran rapidez. Mucha de la luz emitida está en la región ultravioleta. Este es el proceso de excitación primario. El proceso secundario ocurre cuando la luz ultravioleta golpea los *fósforos*, materiales en polvo que se encuentran sobre la superficie interior del tubo. Los fósforos se excitan por la absorción de los fotones ultravioleta y presentan fluorescencia, emitiendo una multitud de fotones de frecuencia más baja que se combinan para producir luz visible. Pueden usarse diferentes fósforos para producir diferentes colores o "texturas" de luz.

## Lámpara fluorescente compacta

Miniaturiza un tubo fluorescente, enróllalo en una bobina y equípalo con el mismo tipo de conector que tiene una lámpara incandescente común, y tendrás una lámpara fluorescente compacta (CFL, por sus siglas en inglés). Al igual que las lámparas fluorescentes tipo tubo tradicionales, las CFL son más eficientes que las lámparas incandescentes y producen alrededor de 4 veces más luz por la misma entrada de potencia. Se colocan en los portalámparas convencionales y tienen duraciones 10 mayores que las bombillas incandescentes. Como se mencionó aquí y en el Capítulo 23, las lámparas incandescentes se están sustituyendo con iluminación más eficiente.

Al igual que la lámpara tubular, una CFL tiene dos partes principales: el tubo lleno de gas (vapor de mercurio mezclado con argón) y el balastro magnético o electrónico. Mientras que el balastro utilizado en los primeros tubos fluorescentes era magnético, ahora son mucho más frecuentes los balastros electrónicos y no parpadean como los anteriores. El balastro proporciona la potencia inicial para activar una descarga de arco, incrementa la frecuencia operativa mediante sus transistores y estabiliza la corriente. Los fósforos del interior de la lámpara pueden elegirse para producir no sólo diferentes tonos de luz blanca, sino también luz de color: amarillo para una iluminación exterior que no atrae insectos, o ultravioleta de onda larga para efectos especiales.

Un inconveniente de las lámparas fluorescentes, ya sean compactas o no, es su contenido de mercurio, que plantea problemas ambientales con su desecho. Una alternativa más atractiva para la iluminación son las bombillas LED con portalámparas del tipo rosca.

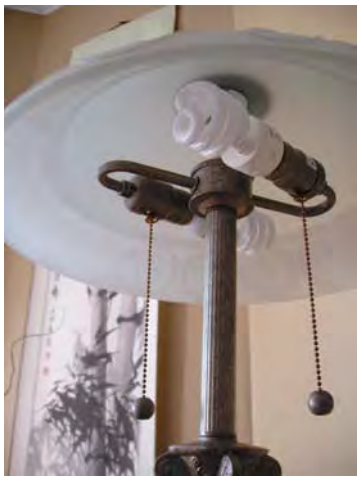


**FIGURA 30.16**
Este par de CFL de 23 W emite tanta luz como un par de bombillas incandescentes de 100 W que funcionan al mismo voltaje.

**SCREENCAST: Lámparas**

## Diodo emisor de luz

Un diodo es un dispositivo electrónico con dos terminales que permite un flujo de carga en una sola dirección. Recuerda del Capítulo 23 la breve exposición del uso de un diodo para convertir CA en CD en circuitos eléctricos. Los diodos cumplen varias funciones, como la regulación de voltaje en circuitos, la amplificación de señales, la medición de la iluminación y la conversión de luz en electricidad como fotoceldas. Un tipo de diseño de diodo es el inverso de una fotocelda, ¡en el que un voltaje estimula la emisión de luz! Este es un diodo emisor de luz (LED, por sus siglas en inglés). Los primeros LED creados en la década de 1960 producían la luz roja común en los paneles de instrumentos de la época. Te hacían saber si tu sistema de música estaba encendido o apagado. Los LED que emiten un rango completo de colores se desarrollaron en la década de 1990. En la actualidad, los LED no sólo se utilizan en los indicadores de las pantallas de los aparatos electrónicos, sino que son comunes en los semáforos, las luces de frenado de los automóviles, la iluminación de las pistas de aterrizaje de los aeropuertos, las luces de advertencia en las torres de transmisión de televisión e incluso en los anuncios espectaculares. Los LED son compactos y eficientes, no necesitan filamentos, son de larga duración (unas 100 veces más duraderos que las bombillas incandescentes) y no contienen mercurio dañino.

**FIGURE 30.17**
Evan sostiene dos LED. El más grande, un GeoBulb (www.ccrane.com), utiliza menos de 8 W y es el primer reemplazo directo de una bombilla incandescente de 60 W del mismo tamaño. El LED más pequeño, común en las linternas, emite 15 veces más luz por watt que una bombilla incandescente.

Cuando un diodo acumula luz y produce electricidad, es una celda solar. Cuando la entrada es electricidad y la salida es luz, es un LED. ¡Otra agradable simetría en la física!

En el diseño común de un LED, una capa de un semiconductor que contiene electrones libres se deposita sobre la superficie de otro semiconductor que contiene "agujeros" de energía que pueden aceptar los electrones libres. Una barrera eléctrica en la frontera de estos dos materiales bloquea el flujo de electrones (Figura 30.18a). Pero cuando se aplica una voltaje externo, la barrera es superada y los electrones energéticos cruzan sobre ella y "caen" en los "agujeros" de energía. En una forma similar a la desexcitación, los electrones caídos pierden energía potencial que se convierte en cuantos de luz: fotones (Figura 30.18b). Al igual que una bola de boliche que rueda sobre una mesa produce un fuerte "tronido" cuando golpea el piso, el "tronido" análogo de los electrones en un LED es la emisión de luz. La energía de los electrones que disminuye se convierte en luz.

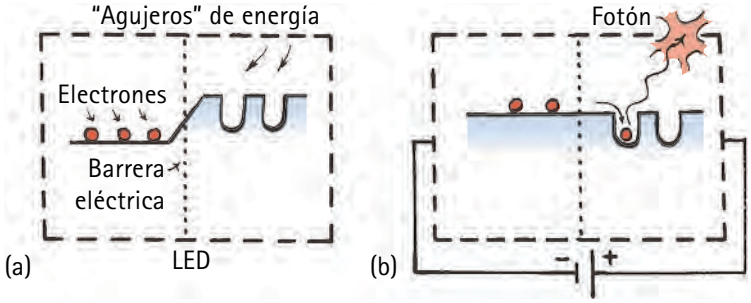



**FIGURE 30.18**
(a) Un chip LED consiste en dos semiconductores, uno con electrones flojos y el otro con "agujeros".
(b) Cuando un voltaje se aplica, los electrones cruzan la barrera, ocupan los "agujeros" y emiten luz. El chip de 0.25 mm cuadrados está rodeado con un domo epóxico transparente (no se muestra) de aproximadamente 2-10 mm de diámetro.

**pti**

- Un tipo de diodo, el diodo emisor de luz orgánico (OLED, por sus siglas en inglés), es delgado, ligero, brillante y fácil de fabricar. Tal vez los OLED lleguen a ser importantes en la producción de grandes pantallas flexibles, decoraciones para muros, ¡e incluso ropa iluminada! ¡Esta posibilidad le confiere un nuevo significado a la frase "blue jeans"!

Los elementos utilizados en la fabricación de un LED determinan la profundidad de los "agujeros" de energía y, por tanto, el color de los fotones emitidos. Un mayor descenso de energía libera luz más cerca del azul; un menor descenso de energía libera luz hacia el rojo. La enorme pantalla LED comercial del tablero que se muestra en las fotografías al inicio del capítulo está compuesta de conjuntos de LED en series de tres. Cada LED de una serie puede producir un solo color: rojo, verde o azul. Como con las pantallas de televisión, cada LED se activa para producir la mezcla deseada de rojo, verde y azul. Todo el rango de colores sigue las reglas de mezcla de colores del Capítulo 27. Entonces, hay bombillas LED de luz blanca que emplean fósforos.

**SCREENCAST: Luz láser**

## 30.9 Láseres

Los fenómenos de excitación, fluorescencia y fosforescencia sirven de base para el funcionamiento de un instrumento fascinante, el **láser** (acrónimo en inglés de amplificación de luz por emisión estimulada de radiación).[5] Si bien el primer láser se concibió en 1958 y en realidad se fabricó en 1960, el concepto de emisión estimulada lo predijo Albert Einstein en 1917. Para entender cómo opera un láser, primero debes estudiar la *luz coherente*.

La luz emitida por una lámpara común es incoherente; esto es: se emiten fotones de muchas frecuencias y en muchas fases de vibración. La luz es tan incoherente como las huellas sobre el piso de un auditorio cuando una multitud de personas caminan en desorden por el lugar. La luz incoherente es caótica. Un haz de luz incoherente se dispersa desde una corta distancia, y se vuelve cada vez más ancho y menos intenso a mayor distancia.

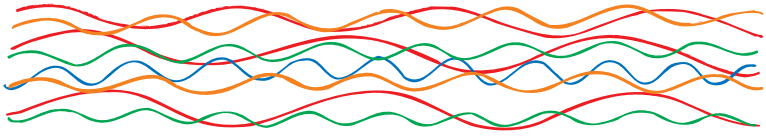


**FIGURA 30.19**
La luz blanca incoherente contiene ondas de muchas frecuencias (y de muchas longitudes de onda) que están fuera de fase entre sí.

[5]Una palabra que se construye con las iniciales de una frase se llama *acrónimo*.

Incluso si el haz se filtra de modo que consista en ondas de una sola frecuencia (luz monocromática), todavía es incoherente porque las ondas están fuera de fase entre sí.

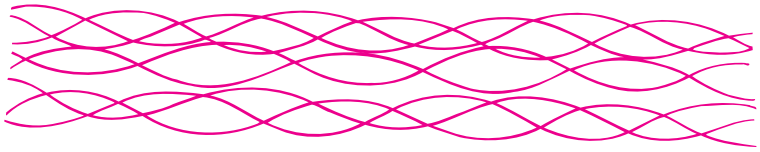


**FIGURA 30.20**
La luz de una sola frecuencia y longitud de onda todavía contiene una mezcla de fases.

Un haz de fotones que tenga la misma frecuencia, fase y dirección (esto es, un haz de fotones que sean copias idénticas unos de otros) se dice que es *coherente*. Un láser emite un haz de luz coherente que se dispersa y se debilita muy poco.[6]

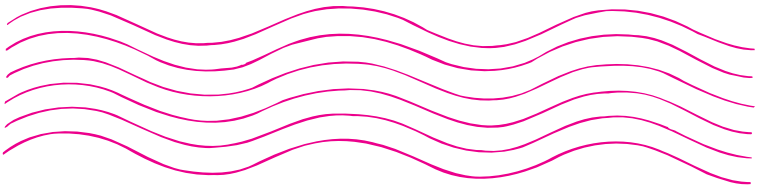


**FIGURA 30.21**
Luz coherente. Todas las ondas son idénticas, están en fase y en la misma dirección.

Todo láser tiene una fuente de átomos llamada medio activo, que puede ser un gas, un líquido o un sólido (el primer láser fue un cristal rubí). Los átomos en el medio se excitan a estados metaestables mediante una fuente de energía externa. Cuando la mayoría de los átomos en el medio se excita, un solo fotón de un átomo que experimenta desexcitación puede comenzar una reacción en cadena. Este fotón golpea otro átomo y lo estimula a emitir, y así sucesivamente, lo que produce luz coherente. La mayor parte de esta luz inicialmente se mueve en direcciones aleatorias. Sin embargo, la luz que viaja a lo largo del eje del láser se refleja en espejos recubiertos para reflejar la luz con la longitud de onda deseada en forma selectiva. Un espejo es totalmente reflector, mientras que el otro refleja de manera parcial. Las ondas reflejadas se refuerzan entre sí después de dar un viaje completo y reflejarse en los dos espejos; esto establece una condición de resonancia de ida y vuelta en la que la luz se acumula hasta una intensidad considerable. La luz que escapa por el extremo con el espejo más transparente constituye el haz del láser. Además de los láseres de gas y cristal, hay otros tipos se han incorporado a la familia láser: láseres de vidrio, químicos, líquidos y semiconductores. Los modelos actuales producen haces que varían del infrarrojo al ultravioleta. Algunos modelos pueden ajustarse a varios rangos de frecuencia.

Un láser no es una fuente de energía. Es simplemente un convertidor de energía que aprovecha el proceso de emisión estimulada para concentrar cierta fracción de su energía (en general, 1%) en energía radiante de una sola frecuencia que se mueve en una sola dirección. Al igual que todos los dispositivos, un láser no puede sacar más energía de la que se pone en él.

Los láseres tienen un amplio uso en cirugía. Los láseres también se utilizan en procedimientos de corte y soldadura, principalmente cuando hay partes pequeñas. Cortan con precisión. Los haces láser sueldan alambres en microcircuitos y reparan alambres dañados dentro de tubos de vidrio. Se usan para leer CD y DVD, y crean hologramas. Un día, podrán desencadenar energía de fusión controlada. En las comunicaciones tienen un enorme uso. Mientras que las longitudes de onda de radio abarcan cientos de metros y las longitudes de onda de televisión abarcan muchos centímetros, las

Un haz láser no se ve a menos que se disperse gracias a algo que esté en el aire. Al igual que los rayos solares o los rayos lunares, lo que ves son las partículas en el medio de dispersión, no el haz en sí. Cuando el haz golpea una superficie difusa, parte de él se dispersa hacia tus ojos como un punto.

[6]Lo angosto de un haz láser es evidente cuando ves que un conferencista produce una diminuta mancha roja sobre una pantalla con su "apuntador" láser. La luz de un láser intenso apuntado a la Luna se ha reflejado y detectado de vuelta sobre la Tierra; con ello se ha revelado la distancia entre la Tierra y la Luna con un margen de una pulgada.

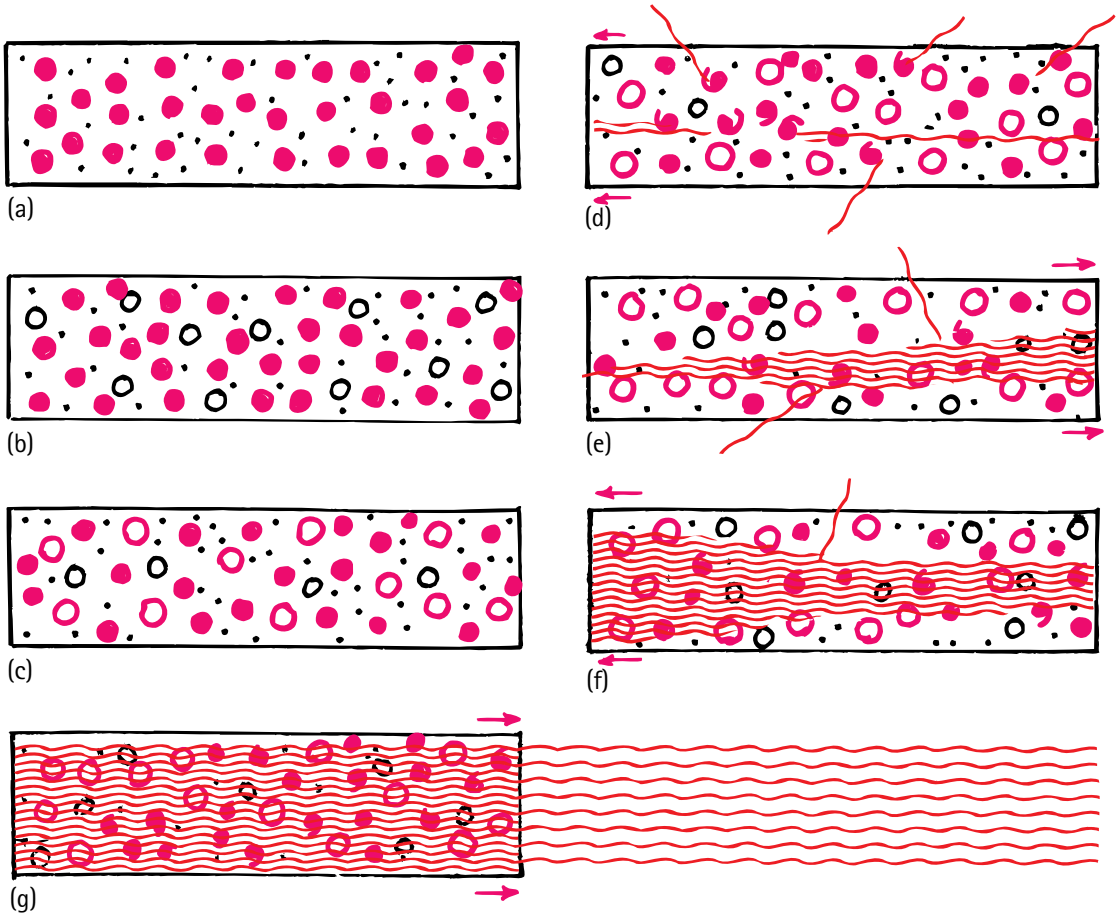



**FIGURA 30.22**
Acción láser en un láser helio-neón.
(a) El láser consiste en un estrecho tubo Pyrex que contiene una mezcla de gases a baja presión que consta de 85% de helio (pequeños puntos negros) y 15% de neón (grandes puntos de color).
(b) Cuando una corriente de alto voltaje pasa por el tubo, excita a los átomos de helio y de neón hasta sus estados más altos habituales y de inmediato experimentan desexcitación, excepto por un estado en el helio que se caracteriza por una demora prolongada antes de su desexcitación: un *estado metaestable*. Dado que este estado es relativamente estable, se acumula una población importante de átomos de helio excitados (círculos abiertos negros). Estos átomos vagan en el tubo y actúan como una fuente de energía para el neón, que de otro modo tiene un estado metastable difícil de alcanzar muy cercano a la energía del helio excitado.
(c) WCuando los átomos de helio excitados chocan con átomos de neón en sus estados de energía más bajos (estado base), el helio cede su energía al neón, que es elevado a su estado metastable (círculos abiertos rojos). El proceso continúa y la población de átomos de neón excitados pronto supera a los átomos de neón en un estado excitado de menor energía. Esta población invertida, en efecto, espera irradiar su energía.
(d) Algunos átomos de neón a la larga se desexcitan e irradian fotones rojos en el tubo. Cuando esta energía radiante pasa a otros átomos de neón excitados, los primeros se estimulan para emitir fotones exactamente en fase con la energía radiante que estimuló la emisión. Los fotones salen del tubo en direcciones irregulares, lo que produce un brillo rojo.
(e) Los fotones que se mueven paralelos al eje del tubo se reflejan en espejos paralelos con un recubrimiento especial en los extremos del tubo. Los fotones reflejados estimulan la emisión de fotones desde otros átomos de neón, lo que en consecuencia produce una avalancha de fotones que tienen la misma frecuencia, fase y dirección.
(f) Los fotones destellan de ida y vuelta entre los espejos, y se amplifican con cada paso.
(g) Algunos fotones se "fugan" de uno de los espejos, que sólo es parcialmente reflector. Esto constituye el rayo láser.

longitudes de onda de la luz láser se miden en millonésimas de centímetro. En correspondencia, las frecuencias de la luz láser son mucho mayores que las frecuencias de radio y televisión. Como resultado, la luz láser puede transmitir un enorme número de mensajes apiñados en una banda de frecuencias muy estrecha. Las comunicaciones pueden transmitirse en un haz láser dirigido a través del espacio, a través de la atmósfera o a través de fibras ópticas (tuberías de luz) que pueden doblarse como cables.

El láser actúa en las cajas registradoras de los supermercados, donde máquinas lectoras de códigos escanean el símbolo de Código de Producto Universal (UPC) impreso en los paquetes y en la cubierta posterior de este libro. La luz láser se refleja de las barras y los espacios y se convierte en una señal eléctrica cuando se escanea el símbolo. La señal sube a un valor alto cuando se refleja desde un espacio claro y cae hasta un valor bajo cuando se refleja de una barra oscura. La información en el grosor y espaciamiento de las barras se "digitaliza" (convierte en 1 y 0 de código binario) y se procesa mediante una computadora.

Los científicos ambientales usan láseres para medir y detectar contaminantes en los gases de los escapes de los vehículos. Diferentes gases absorben luz a longitudes de ondas características y dejan sus "huellas digitales" sobre un haz reflejado de luz láser. La longitud de onda específica y la cantidad de luz absorbida se analizan en una computadora, que produce una tabulación inmediata de los contaminantes.

Los láseres vaticinan toda una nueva tecnología, cuya promesa se convierte en realidad continuamente. El futuro de las aplicaciones del láser parece ilimitado.

**FIGURA 30.23**
Un láser de helio-neón.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Excitación.** Proceso de elevar uno o más electrones de un átomo o molécula de un nivel de energía más bajo a uno más alto. Un átomo en un estado excitado por lo general decaerá (se desexcitará) con rapidez a un estado más bajo mediante la emisión de un fotón. La energía del fotón es proporcional a su frecuencia: $E = hf$.

**Espectro de emisión.** Distribución de las longitudes de onda que están en la luz proveniente de una fuente luminosa.

**Espectroscopio.** Instrumento óptico que separa la luz en sus longitudes de onda que la constituyen en la forma de líneas espectrales.

**Incandescencia** Estado de brillo mientras la temperatura es alta, causado por los electrones que rebotan sobre dimensiones mayores que el tamaño de un átomo y emiten energía radiante en el proceso. La frecuencia pico de la energía radiante es proporcional a la temperatura absoluta de la sustancia calentada: $\bar{f} \sim T$.

**Espectro de absorción.** Un espectro continuo, como el de la luz blanca, interrumpido por líneas o bandas oscuras derivadas de la absorción de luz de ciertas frecuencias por una sustancia a través de la cual pasa la energía radiante.

**Fluorescencia.** Propiedad de ciertas sustancias de absorber radiación de una frecuencia y reemitir radiación de frecuencia más baja. La fluorescencia ocurre cuando un átomo se eleva a un estado excitado y pierde su energía en dos o más saltos descendentes hacia un estado de energía más bajo.

**Fosforescencia.** Un tipo de emisión de luz que es igual a la fluorescencia, excepto por un retraso entre la excitación y la desexcitación, lo que proporciona postluminiscencia. El retraso es causado por átomos excitados a estados energéticos que no decaen en forma rápida. La postluminiscencia puede durar desde fracciones de segundo hasta horas o incluso días, de acuerdo con el tipo de material, la temperatura y otros factores.

**Láser.** amplificación de luz por emisión estimulada de radiación (del inglés ***l**ight **a**mplification by **s**timulated **e**mission of **r**adiation*) Instrumento óptico que produce un haz de luz monocromática coherente.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 30.1 Emisión de luz

1. Los electrones puestos a vibrar a algunos cientos de miles de hertz emiten ondas de radio. ¿Qué clase de ondas se emiten de las vibraciones electrónicas de algunos trillones de hertz?
2. ¿Qué se entiende cuando se dice que un estado de energía es *discreto*?

### 30.2 Excitación

3. ¿Cuáles tienen más energía potencial en relación con el núcleo: los electrones en las capas electrónicas interiores o los electrones en las capas electrónicas exteriores?
4. En un tubo de neón, ¿qué ocurre inmediatamente después de que un átomo se excita?

5. ¿Cómo se relaciona la *diferencia de energía* entre los niveles energéticos, con la *energía del fotón* que se emite por una transición entre dichos niveles?
6. ¿Cómo se relaciona la energía de un fotón con su frecuencia vibratoria?
7. ¿Cuál tiene mayor *frecuencia*: la luz roja o la luz azul? ¿Cuál tiene la mayor *energía* por fotón: la luz roja o la luz azul?
8. ¿Un átomo de neón en un tubo de vidrio puede excitarse más de una vez? Explica.
9. ¿Qué indican los colores variados mostrados en la flama de un leño ardiendo?
10. ¿Cuál pone el mayor porcentaje de su energía como luz: una lámpara incandescente o una lámpara de vapor de mercurio?

### 30.3 Espectros de emisión

11. ¿Qué es un espectroscopio y qué es lo que hace?

### 30.4 Incandescencia

12. Cuando un gas brilla, se emiten colores discretos. Cuando un sólido brilla, los colores son borrosos. ¿Por qué?
13. ¿Cómo se relaciona la frecuencia pico de la luz emitida, con la temperatura de su fuente incandescente?

### 30.5 Espectros de absorción

14. ¿Cómo difiere la apariencia de un espectro de absorción de la de un espectro de emisión?
15. ¿Qué son las líneas de Fraunhofer?
16. ¿Cómo es que un astrofísico puede decirte si una estrella se aleja o se aproxima a la Tierra?

### 30.6 Fluorescencia

17. ¿Por qué la luz ultravioleta, pero no la luz infrarroja, es efectiva para hacer fluorescentes ciertos materiales?

### 30.7 Fosforescencia

18. Distingue entre fluorescencia y fosforescencia.
19. ¿Qué es un estado metaestable?

### 30.8 Lámparas

20. ¿Por qué se usa argón, en lugar de aire, dentro de una bombilla incandescente?
21. Distingue entre los procesos de excitación primaria y secundaria que ocurren en una lámpara fluorescente.
22. ¿Cómo se compara la duración de una CFL típica con la duración de una bombilla incandescente?
23. ¿Cómo se compara la duración de un LED típico con la duración de una bombilla incandescente?

### 30.9 Láseres

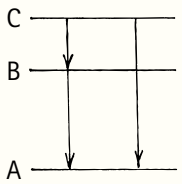
24. Distingue entre la luz monocromática y la luz solar.
25. Distingue entre la luz coherente y la luz solar.
26. ¿Cómo difiere la avalancha de fotones en un haz láser, de las multitudes de fotones emitidos por una lámpara incandescente?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

27. Chatea con o escribe una carta a la abuela para explicarle cómo las lámparas, flamas y láseres emiten luz. Cuéntale por qué los tintes y pinturas fluorescentes son tan impresionantemente vívidos cuando se iluminan con una lámpara ultravioleta. Háblale también de las mayores eficiencias de las CFL y los LED.
28. Pide a tu instructor de física que te preste una rejilla de difracción. Su aspecto es el de una diapositiva fotográfica, y la luz que pasa o se refleja en ella se difracta en sus colores componentes mediante miles de líneas finas. Mira a través de la rejilla la luz proveniente de una farola de vapor de sodio. Si se trata de una lámpara de presión baja, verás la agradable "línea" espectral amarilla que domina a la luz de sodio (en realidad, son dos líneas estrechamente espaciadas). Si la farola es redonda, verás círculos en lugar de líneas; si miras por una rendija cortada en cartón o algún material similar, verás líneas. Lo que ocurre con las ahora comunes lámparas de sodio a alta presión es más interesante. Debido a las colisiones de los átomos excitados, verás un espectro borroso que es casi continuo, casi como el de una lámpara incandescente. Justo en la posición amarilla, donde esperarías ver la línea de sodio, hay un área oscura. Esta es la banda de absorción del sodio. Se debe al sodio más frío, que rodea la región de emisión de alta presión. Deberás ver esto más o menos a una cuadra de distancia de modo que la línea, o círculo, sea suficientemente pequeña como para permitir que se mantenga la resolución. Intenta esto. ¡Es muy fácil de ver!

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

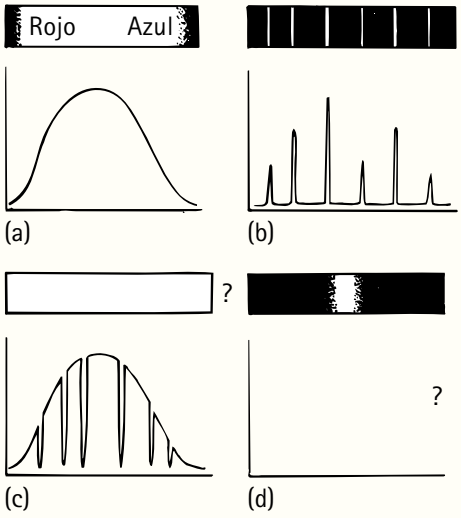
29. En el diagrama, la diferencia de energía entre los estados A y B es el doble que la diferencia de energía entre los estados B y C. En una transición (salto cuántico) de C a B, un electrón emite un fotón con una longitud de onda de 600 nm.
(a) ¿Cuál es la longitud de onda emitida cuando el fotón salta de B a A?
(b) ¿Cuando **éste** salta de C a A?



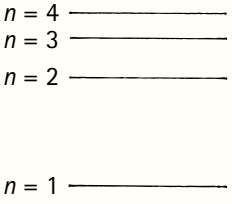

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

30. ¿Por qué un fotón de rayos gamma es más energético que un fotón de rayos X?
31. ¿Alguna vez viste un incendio y observaste que la quema de varios materiales con frecuencia produce llamas de diferentes colores? ¿Por qué esto es así?
32. Cuando los electrones en una sustancia hacen una transición particular de niveles de energía, se emite luz verde. Si en vez de ello se emitiera luz azul de la misma sustancia, ¿correspondería a un mayor o a un menor cambio de energía en el átomo?
33. La luz ultravioleta causa quemaduras, mientras que la luz visible, incluso de mayor intensidad, no las produce. ¿Por qué?
34. Si duplicas la frecuencia de la luz, duplicas la energía de cada uno de sus fotones. Si en vez de ello duplicas la longitud de onda de la luz, ¿qué ocurre con la energía de los fotones?
35. ¿Por qué a una señal de neón al final no se le "agotan" los átomos que excitar y produce luz cada vez más tenue?
36. Un investigador quiere que las líneas espectrales de un espectro sean crecientes pequeños. ¿Qué cambio en el espectroscopio logrará esto?
37. Si la luz pasara por un orificio redondo en lugar de una delgada rendija en un espectroscopio, ¿cómo aparecerían las "líneas" espectrales? ¿Cuál es el inconveniente de un orificio comparado con una rendija?
38. Si usas un prisma o una rejilla de difracción para comparar la luz roja de un tubo de neón común y la luz roja de un láser helio-neón, ¿qué sorprendente diferencia verás?
39. ¿Cuál es la evidencia que permite afirmar que hay hierro en la capa exterior relativamente fría del Sol?
40. ¿Cómo podrían distinguirse las líneas de Fraunhofer en el espectro de la luz solar, que se deben a absorción en la atmósfera del Sol, de las debidas a la absorción por gases en la atmósfera de la Tierra?
41. ¿En qué forma específica la luz de las estrellas y las galaxias distantes dice a los astrónomos que los átomos en todo el universo tienen las mismas propiedades que en la Tierra?
42. ¿Qué diferencia ve un astrónomo entre el espectro de emisión de un elemento en una estrella que se aleja y un espectro del mismo elemento en el laboratorio? (*Sugerencia*: esto se relaciona con las mediciones de frecuencia para una fuente ondulatoria en movimiento.)
43. Una estrella azul es aproximadamente el doble de caliente que una estrella roja. Pero las temperaturas de los gases en los letreros publicitarios son aproximadamente iguales, ya sea que emitan luz roja o azul. ¿Cuál es tu explicación?
44. ¿Cuál tiene mayor energía: un fotón de luz infrarroja, de luz visible o de luz ultravioleta?
45. ¿La excitación atómica ocurre en los sólidos así como en los gases? ¿Cómo es que la energía radiante de un sólido incandescente difiere de la energía radiante emitida por un gas excitado?
46. Las lámparas de vapor de sodio de baja presión emiten espectros de líneas con longitudes de onda bien definidas, pero las lámparas de vapor de sodio de alta presión emiten luz cuyas líneas están más dispersas. Relaciona esto con la mancha continua de longitudes de onda emitidas por los sólidos.
47. El filamento de una lámpara está hecho de tungsteno. ¿Por qué se obtiene un espectro continuo en lugar de un espectro de líneas de tungsteno cuando la luz de una lámpara incandescente se ve con un espectroscopio?
48. ¿Cómo es que un átomo de hidrógeno, que sólo tiene un electrón, puede tener tantas líneas espectrales?
49. Dado que un gas que absorbe reemite la luz que absorbe, ¿por qué hay líneas oscuras en un espectro de absorción? Esto es: ¿por qué la luz reemitida no sólo llena los lugares oscuros?
50. Si los átomos de una sustancia absorben luz ultravioleta y emiten luz roja, ¿en qué se convierte la energía "perdida"?
51. (a) La luz proveniente de una fuente incandescente pasa a través de vapor de sodio y luego se examina con un espectroscopio. ¿Cuál es la apariencia del espectro? (b) La fuente incandescente se desconecta y el sodio se calienta hasta que brilla. ¿Cómo se compara el espectro del sodio calentado con el espectro observado antes?
52. Tu amigo razona que si la luz ultravioleta puede activar el proceso de fluorescencia, la luz infrarroja también debería hacerlo. Tu amigo te mira en busca de tu aprobación o desaprobación de esta idea. ¿Cuál es tu posición?
53. Cuando la luz ultravioleta cae sobre ciertos tintes, se emite luz visible. ¿Por qué no ocurre esto cuando luz infrarroja cae sobre dichos tintes?
54. ¿Por qué las telas que tienen fluorescencia cuando se exponen a luz ultravioleta también brillan en la luz solar?

55. ¿Por qué diferentes minerales fluorescentes emiten diferentes colores cuando se iluminan con luz ultravioleta?
56. Algunas puertas tienen combinaciones de resorte y amortiguador para que cierren de manera lenta cuando se sueltan. ¿En qué se parece esto a la fosforescencia?
57. Cuando ciertos materiales se iluminan con luz visible, electrones saltan de los estados energéticos más bajos a los más altos en los átomos del material. Cuando se iluminan con luz ultravioleta, los átomos se ionizan de modo que algunos de ellos expulsan electrones. ¿Por qué los dos tipos de iluminación producen resultados tan diferentes?
58. Para mantener calientes a los pollos en un gallinero, ¿por qué una CFL sería una mala elección comparada con una bombilla incandescente?
59. ¿Por qué los LED son las lámparas de elección en los lugares difíciles de alcanzar, como los techos altos?
60. ¿Qué color resulta cuando brillan juntos un LED rojo y uno verde?
61. Cita al menos dos razones para predecir que los LED a la larga serán más populares que las CFL.
62. El precursor del láser involucró microondas en lugar de luz visible. ¿Qué significa la palabra *máser*?
63. El primer láser consistió en una barra de rubí rojo activada por una lámpara de destello que emitía luz verde. ¿Por qué no funcionaría un láser compuesto con una barra de cristal verde y una lámpara de destello que emita luz roja?
64. ¿Cómo es que las avalanchas de fotones en un haz láser difieren de las multitudes de fotones emitidos por una lámpara incandescente?
65. En el funcionamiento de un láser helio-neón, ¿por qué es importante que el estado metaestable del helio sea relativamente de larga duración? (¿Cuál sería el efecto de que este estado se desexcitara con mucha rapidez?) (Consulta la Figura 30.22.)
66. En el funcionamiento de un láser helio-neón, ¿por qué es importante que el estado metaestable en el átomo de helio coincida lo más posible con el nivel de energía de un estado metaestable más difícil de alcanzar en el neón?
67. Un amigo especula que los científicos de un determinado país crearon un láser que produce mucha más energía de la que se pone en él y pide tu opinión. ¿Cuál es tu respuesta?
68. Un láser no puede producir más energía de la que se pone en él. Sin embargo, un láser puede producir pulsos de luz que tienen más salida de potencia que la potencia de entrada necesaria para que funcione el láser. Explica.
69. En la ecuación $\overline{f} \sim T$, ¿qué representan los símbolos $\overline{f}$ y $T$?
70. Se sabe que el filamento de una lámpara incandescente a 2,500 K irradia luz blanca. ¿El filamento de la lámpara también irradia energía cuando está a temperatura ambiente?
71. Se sabe que el Sol irradia energía. ¿La Tierra igualmente irradia energía? Si es así, ¿cuál es la diferencia en sus radiaciones?
72. Dado que todo objeto tiene una temperatura, todo objeto irradia energía. ¿Por qué entonces no puedes ver los objetos en la oscuridad?
73. De vuelta al Capítulo 16, dado que todos los cuerpos irradian energía, ¿por qué no todos los cuerpos se vuelven más fríos?
74. Si continúas calentando un trozo de metal que en un inicio estaba a temperatura ambiente, en una habitación oscura, comenzará a brillar visiblemente. ¿Cuál será su primer color visible y por qué?
75. ¿Cómo se comparan las temperaturas superficiales de las estrellas rojizas, azuladas y blancuzcas?
76. El dibujo (a) muestra una curva de radiación de un sólido incandescente. El dibujo (b) muestra la "curva de radiación" de un gas excitado y su patrón espectral de emisión. El dibujo (c) muestra la curva producida cuando un gas frío está entre una fuente incandescente y el observador; el patrón espectral correspondiente se deja como ejercicio para que tú lo construyas. El dibujo (d) muestra el patrón espectral de una fuente incandescente vista a través de un trozo de vidrio verde; tú debes dibujar la correspondiente curva de radiación.




77. Los elementos en la superficie del Sol se revelan en el espectro solar. ¿Las líneas en el espectro son las de emisión o las de absorción?
78. Considera sólo cuatro de los niveles de energía de un átomo determinado, como se muestra en el diagrama de abajo. ¿Cuántas líneas espectrales resultarán de todas las posibles transiciones entre estos niveles? ¿Cuál transición corresponde a la luz emitida con frecuencia más alta? ¿A la luz emitida con frecuencia más baja?



79. Un electrón se desexcita desde el cuarto nivel cuántico del diagrama de la pregunta anterior hacia el tercero, y luego directamente hacia el estado base. Se emiten dos fotones. ¿Cómo se compara la suma de sus frecuencias con la frecuencia del fotón individual que se emitiría por la desexcitación desde el cuarto nivel directamente hasta el estado base?
80. Para la transición descrita en el ejercicio anterior, ¿hay alguna relación entre las longitudes de onda de los fotones emitidos?
81. Supón que los cuatro niveles de energía en la pregunta 78 de algún modo estuvieran igualmente espaciados. ¿Cuántas líneas espectrales resultarían?

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

82. Un láser de laboratorio tiene una potencia de sólo 0.8 mW, $8 \times 10^{-4}$ W. ¿Por qué parece más poderoso que la luz proveniente de una lámpara de 100 W?
83. Puedes calentar un pedazo de metal al rojo vivo y luego al rojo blanco. ¿Puedes calentarlo hasta que el metal brille azul?
84. Si ves una estrella roja, puedes estar seguro de que su intensidad pico está en la región infrarroja. ¿Por qué esto es así?
85. Si ves una estrella "al rojo violeta", puedes estar seguro de que su intensidad pico está en el rango ultravioleta. ¿Por qué esto es así?
86. Una estrella "al rojo verde" se percibe no como verde, sino como blanca. ¿Por qué? (*Sugerencia*: considera la curva de radiación de las Figuras 27.7 y 27.8, y la Figura 30.7.)

# 31

CAPÍTULO 31

# Cuantos de luz


31.1 El nacimiento de la teoría cuántica

31.2 Cuantización y la constante de Planck

31.3 Efecto fotoeléctrico

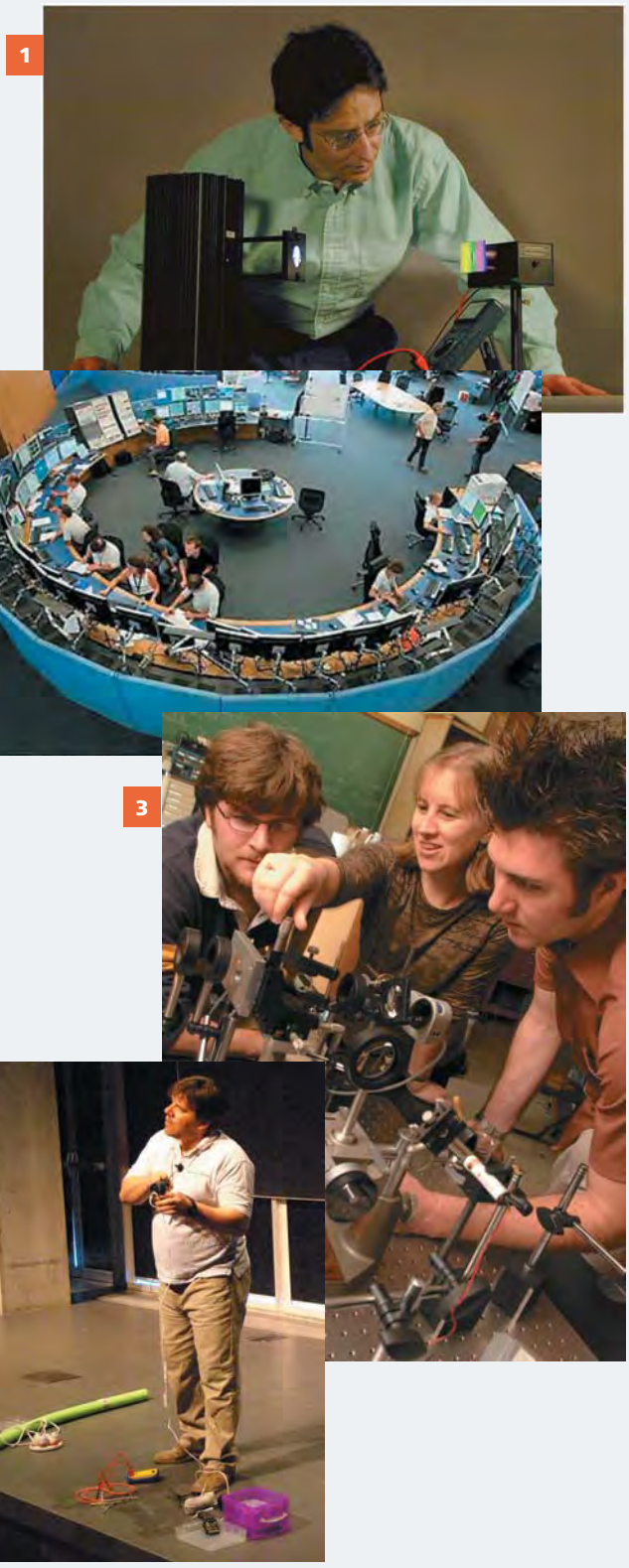
31.4 Dualidad onda-partícula

31.5 Experimento de la doble rendija

31.6 Partículas como ondas: difracción de electrones

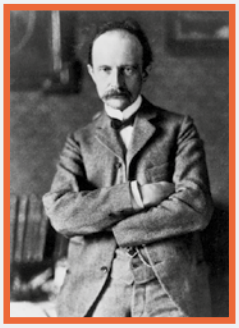
31.7 Principio de incertidumbre

31.8 Complementariedad

**1** Phil Wolf, coautor de *Resolución de problemas en Física conceptual*, dirige luz de diferentes frecuencias sobre una fotocelda y mide las energías de los electrones expulsados para demostrar el efecto fotoeléctrico. **2** Físicos ocupados en el centro de control del Sincrotrón Súper Protón del CERN en Francia, en la frontera suiza cerca de Ginebra. El centro de control combina las salas de control de los ocho aceleradores del laboratorio. **3** Anne Cox, coautora de *Physlet Quantum Physics*, alinea unas pinzas ópticas con sus estudiantes en el Eckerd College, de Florida. **4** Gary Williams explica el funcionamiento de una cámara de seguridad infrarroja a su audiencia en el Reino Unido.

Durante su juventud en Alemania, Max Planck fue un músico talentoso. Cantaba, tocaba instrumentos musicales y compuso canciones y óperas. Sin embargo, en lugar de estudiar música, decidió estudiar física, y obtuvo su doctorado en 1879, cuando tenía 21 años de edad. En la época, las dos grandes teorías de la física que se seguían activamente eran la termodinámica, el estudio del calor, y el electromagnetismo, el estudio de la radiación. Planck no imaginaba que, al tratar de combinar estos dos campos, daría inicio a toda una física nueva del siglo XX: la *mecánica cuántica*.



En 1900 había preguntas intrigantes sobre la radiación de la energía térmica que seguían sin responderse. La forma en la que la energía de la radiación térmica se distribuía sobre diferentes frecuencias se había medido de manera cuidadosa, pero nadie había podido ofrecer una teoría que explicara los resultados. Con la esperanza de proporcionar una respuesta teórica, Planck, a la "avanzada" edad de 42 años, planteó una hipótesis que llamó "un acto de desesperación". Propuso que, cuando un objeto caliente emite energía radiante, pierde energía no de manera continua sino en cantidades discretas, o bultos, que él denominó *cuantos*. Además, postuló que el cuanto de energía que se irradia es proporcional a la frecuencia de la radiación. Con esta teoría, Planck podía explicar cómo la energía en la radiación térmica se distribuía sobre diferentes frecuencias. Cinco años después, Einstein (entonces de 26 años de edad) dio el siguiente paso y propuso no sólo que la energía se agrega a la luz en unidades cuánticas, sino también que la propia luz existe como bultos cuánticos, o "corpúsculos", más tarde llamados fotones.

En reconocimiento por la introducción del cuanto, Planck recibió el Premio Nobel de Física en 1918. Es muy interesante que el mismo Planck nunca haya aceptado la idea del fotón. En 1912, en una injuria clásica, Planck escribió que, debido a otros logros, Einstein merecía ser miembro de la Academia Prusiana de Ciencias, a pesar de haber errado el camino al proponer un corpúsculo de luz.

Plank tuvo hijas gemelas, Emma y Grete, y dos varones, Karl y Erwin. Durante la Primera Guerra Mundial, el menor de sus hijos, Erwin, fue tomado prisionero por los franceses en 1914, y su hijo mayor, Karl, murió en combate en Verdún. Poco después, con dos años de diferencia, ambas hijas murieron mientras daban a luz. Planck soportó estas pérdidas de un modo estoico.

Cuando Hitler llegó al poder en 1933, Planck al principio esperaba que el nazismo fuera una desgracia temporal, pero con el tiempo mostró su aversión por el plan nazi, y en 1938, como protesta, renunció a la presidencia de la Academia Prusiana. En 1944, en el periodo álgido de la Segunda Guerra Mundial, la casa de Planck en Berlín fue bombardeada y destruida completamente por los aliados. En el mismo año, su hijo Erwin fue implicado en el intento de homicidio de Hitler en el famoso complot del 20 de julio. Aunque se dice que Erwin podía haber sido perdonado si Planck se hubiera unido al partido nazi, Planck se opuso y rehusó unirse. Erwin fue colgado a principios de 1945, lo que devastó a su anciano padre. Planck murió dos años después, en 1947, a los 89 años de edad.

## 31.1 El nacimiento de la teoría cuántica

La física clásica que has estudiado hasta el momento trata con dos categorías de fenómenos: partículas y ondas. De acuerdo con las leyes de Newton, las "partículas" son pequeños objetos como balas que tienen masa y viajan por el espacio en líneas rectas a menos que sobre ellos actúe una fuerza. Del mismo modo, las "ondas", como las del sonido o las del océano, son fenómenos que se *extienden* en el espacio. Cuando una onda viaja a través de una abertura o alrededor de una barrera, la onda se difracta y diferentes partes de la onda interfieren. Por tanto, partículas y ondas son fáciles de distinguir unas de otras. De hecho, tienen propiedades que son mutuamente excluyentes. No obstante, la cuestión de cómo clasificar la luz fue un misterio durante siglos.

Una de las primeras teorías de la naturaleza de la luz es la de Platón, quien vivió en los siglos V y IV antes de nuestra era. Platón pensaba que la luz consistía en serpentinas emitidas por el ojo. Euclides, quien vivió aproximadamente un siglo después, también sostuvo esta idea. Por otra parte, los pitagóricos creían que la luz emanaba de los cuerpos luminosos en forma de partículas muy finas, en tanto que Empédocles, un predecesor de Platón, enseñaba que la luz se componía de ondas de algún tipo que viajaban con gran rapidez. Durante más de 2,000 años la pregunta siguió sin responderse. ¿La luz consiste en ondas o en partículas?

**SCREENCAST: El mundo cuántico**

En 1704, Isaac Newton describió la luz como un chorro de partículas. Sostuvo esta idea a pesar de conocer lo que ahora se denomina polarización y a pesar de su experimento con la luz que se refleja sobre placas de vidrio, en el cual observó franjas de claridad y oscuridad (anillos de Newton). Sabía que sus partículas de luz también debían tener ciertas propiedades ondulatorias. Christian Huygens, contemporáneo de Newton, defendió una teoría ondulatoria de la luz.

Con toda esta historia como contexto, Thomas Young, en 1801, realizó el "experimento de la doble rendija", el cual pareció demostrar, al fin, que la luz es un fenómeno ondulatorio. Esta idea se reforzó en 1862, con la predicción de Maxwell de que la luz porta energía en los campos eléctrico y magnético oscilatorios. Veinticinco años después, Heinrich Hertz utilizó unos geniales circuitos eléctricos para demostrar la realidad de las ondas electromagnéticas (de radiofrecuencia). Como se mencionó antes, Max Planck, en 1900, planteó la hipótesis de que la energía radiante se emite en paquetes discretos, cada uno de los cuales llamó **cuanto**. De acuerdo con Planck, la energía en cada paquete de energía es proporcional a la frecuencia de radiación ($E \sim f$, que se presentó en el Capítulo 30). Su hipótesis dio inicio a una revolución de ideas que cambió por completo la forma de pensar en el mundo físico. La hipótesis de Planck adquirió credibilidad en 1905, cuando Albert Einstein publicó un ensayo ganador del Premio Nobel que ponía en duda la teoría ondulatoria de la luz al argumentar que la luz interactuaba con la materia, no en forma de ondas continuas como vislumbró Maxwell, sino en forma de pequeños paquetes de energía como sugería Planck, y a los que ahora se les denomina *fotones*. En términos generales, al conjunto de leyes planteadas desde 1900 hasta finales de la década de 1920, que describe todos los fenómenos cuánticos del micromundo, se le conoce como **física cuántica**.

## 31.2 Cuantización y la constante de Planck

**SCREENCAST: La constante de Planck y los fotones**

La cuantización, la idea de que el mundo natural es granular en lugar de continuamente liso, por supuesto que no es una idea nueva en la física. La materia está cuantizada; la masa de un lingote de oro, por ejemplo, es igual a cierto múltiplo entero de la masa de un solo átomo de oro. La electricidad está cuantizada, ya que la carga eléctrica siempre es un múltiplo entero de la carga de un solo electrón.

La física cuántica afirma que, en el micromundo del átomo, la cantidad de energía en cualquier sistema está cuantizada: no todos los valores de energía son posibles. Esto es lo mismo que decir que una fogata sólo puede tener determinado calor. Puede arder a 450 °C o puede arder a 451 °C, pero no puede arder a 450.5 °C. ¿Lo crees? Bueno, no deberías, porque, hasta donde pueden medir los termómetros macroscópicos, una fogata puede arder a cualquier temperatura en tanto esté por arriba de la temperatura mínima que se necesita para la combustión. Pero es muy interesante que la energía de la fogata sea la energía compuesta de un gran número, y una gran diversidad, de unidades elementales de energía. Un ejemplo más sencillo es la energía de un haz de luz láser, que es un múltiplo entero de un solo valor más bajo de energía: un cuanto. Los cuantos de luz, y de la radiación electromagnética en general, son los fotones.

Recuerda del Capítulo 30 que la energía de un fotón está dada por $E = hf$, donde $h$ es la **constante de Planck** (el número que resulta cuando la energía de un fotón se divide entre su frecuencia).[1] Verás que la constante de Planck es una constante fundamental de la naturaleza que sirve para establecer un límite inferior a la pequeñez de las cosas. Se clasifica, junto con la velocidad de la luz y la constante gravitacional de Newton, como una constante básica de la naturaleza, y aparece una y otra vez en la física cuántica. La ecuación $E = hf$ proporciona la cantidad más pequeña de energía que puede convertirse en luz con frecuencia $f$. La radiación de la luz no se emite de manera continua, sino como un chorro de fotones, donde cada fotón palpita con una frecuencia $f$ y porta una energía $hf$.

[1]La constante de Planck, $h$, tiene el valor numérico $6.6 \times 10^{-34}$ J·s.

La ecuación $E = hf$ dice por qué la radiación de microondas no puede causar el daño a las moléculas de las células vivas que sí puede causar la luz ultravioleta y los rayos X. La radiación electromagnética interactúa con la materia sólo en paquetes discretos de fotones. De modo que la frecuencia relativamente baja de las microondas asegura una baja energía por fotón. Los fotones ultravioleta, por otra parte, pueden suministrar alrededor de un millón de veces más energía a una molécula debido a que la frecuencia de la radiación ultravioleta es más o menos un millón de veces mayor que la frecuencia de las microondas. Los rayos X, con frecuencias incluso mayores, pueden suministrar aún más.

La física cuántica te dice que el mundo físico es un lugar áspero y granuloso. El mundo del "sentido común" descrito por la física clásica parece liso y continuo porque la granulosidad cuántica está en una escala muy pequeña comparada con los tamaños de las cosas en el mundo familiar. La constante de Planck es pequeña en términos de unidades familiares. Pero no tienes que entrar en el mundo cuántico para encontrar la granulosidad que subyace a la aparente suavidad. Por ejemplo, las áreas donde se mezclan el negro, el blanco y el gris en la fotografía de Max Planck al comienzo de este capítulo y otras fotografías de este libro, no parecen lisas en absoluto cuando las ves con una lupa. Con la amplificación, puedes ver que una fotografía impresa consiste en muchos puntos pequeños. En forma similar, vives en un mundo que es una imagen borrosa del granuloso mundo de los átomos.

Los cuantos de luz, los electrones y otras partículas se comportan como si fueran paquetes en algunos aspectos y ondas en otros.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Qué significa el término *cuanto*?**
2. **¿Cuánta energía total hay en un haz monocromático compuesto de *n* fotones de frecuencia *f*?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Un *cuanto* es la unidad elemental más pequeña de una cantidad. La energía radiante, por ejemplo, está compuesta de muchos cuantos, cada uno de los cuales se llama *fotón*. De modo que mientras más fotones tenga un haz de luz, más energía habrá en el haz.
2. La energía en un haz de luz monocromática que contiene $n$ cuantos es $E = nhf$.

## 31.3 Efecto fotoeléctrico

A finales del siglo XIX, muchos investigadores observaron que la luz podía expulsar electrones de varias superficies metálicas. Esto es el **efecto fotoeléctrico**, usado durante muchos años en los ojos eléctricos, en los exposímetros de los fotógrafos y, antes de la era digital, en las pistas sonoras de las películas. Una extensión del efecto fotoeléctrico está en las actuales celdas eléctricas fotovoltaicas y su potencial para ser una de las principales fuentes de energía.

**SCREENCAST**: Efecto fotoeléctrico

En la Figura 31.1 se muestra un montaje para observar el efecto fotoeléctrico. La luz que alumbra sobre la superficie metálica fotosensible, con carga negativa, libera electrones. Los electrones liberados son atraídos hacia la placa positiva y producen una corriente mensurable. Si en vez de ello la placa se carga apenas con la carga negativa suficiente para repeler electrones, la corriente puede detenerse. Entonces pueden calcularse las energías de los electrones expulsados por la diferencia de potencial fácilmente medible entre las placas.

El efecto fotoeléctrico no fue particularmente sorprendente para los primeros investigadores. La expulsión de electrones podría explicarse mediante la física clásica, que

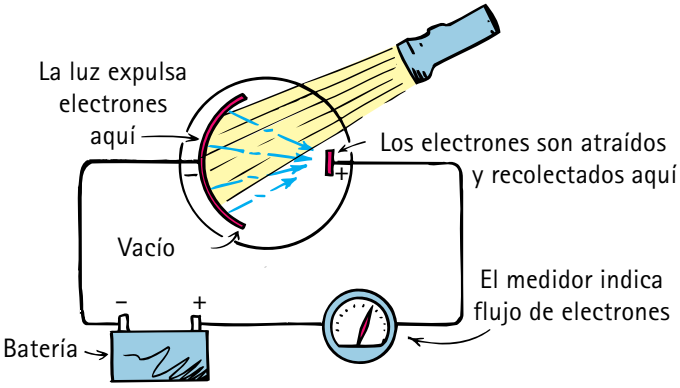



**FIGURA 31.1**
Un aparato usado para observar el efecto fotoeléctrico. Invertir la polaridad y detener el flujo de electrones es una manera de medir la energía de los electrones.

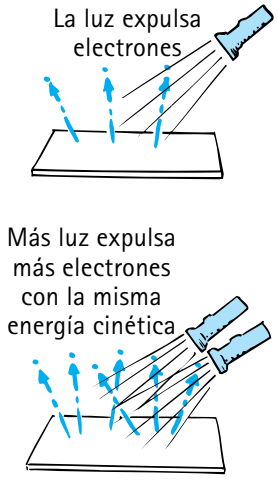



**FIGURA 31.2**
El efecto fotoeléctrico depende de la intensidad.

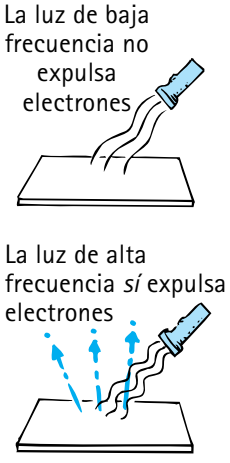



**FIGURA 31.3**
El efecto fotoeléctrico depende de la frecuencia.

representa las ondas de luz incidente que se acumulan en la vibración de un electrón hacia amplitudes cada vez mayores hasta que finalmente se desprenden de la superficie metálica, tal como las moléculas de agua se liberan de la superficie del agua caliente. Se necesitaría mucho tiempo para que una fuente de luz débil cediera a los electrones de un metal suficiente energía para hacer que se desprendan de la superficie. En vez de ello, se descubrió que los electrones son expulsados en cuanto la luz se enciende, pero no se expulsan tantos como con una fuente de luz más intensa. Un examen cuidadoso del efecto fotoeléctrico condujo a varias observaciones que eran contrarias a la imagen ondulatoria clásica:

1. El retraso temporal que hay entre el encendido de la luz y la expulsión de los primeros electrones no era afectada por la intensidad o la frecuencia de la luz.
2. El efecto era fácil de observar con luz violeta o ultravioleta, mas no con luz roja.
3. La tasa a la que se expulsan los electrones era proporcional a la intensidad de la luz.
4. La energía máxima de los electrones expulsados no era afectada por la intensidad de la luz. Sin embargo, había indicios de que la energía del electrón sí dependía de la frecuencia de la luz.

La ausencia de un retraso temporal considerable era especialmente difícil de entender en términos de la imagen ondulatoria. De acuerdo con la teoría ondulatoria, un electrón en luz tenue debe, después de cierta demora, acumular suficiente energía vibratoria para salir volando, mientras que un electrón en luz brillante debería expulsarse casi de inmediato. Sin embargo, esto no ocurría. No era extraño observar un electrón que se expulsaba de inmediato, incluso bajo la luz más débil. Observar que la intensidad de la luz en ninguna forma afectaba las energías de los electrones expulsados también era desconcertante. Los campos eléctricos más intensos de luz más brillante no hacían que los electrones se expulsaran con mayor rapidez. Más electrones se expulsaban con luz más brillante, pero no con rapideces mayores. Por otra parte, un haz débil de luz ultravioleta producía un número menor de electrones expulsados, pero con rapideces mucho mayores. Esto era muy desconcertante.

Einstein ofreció la respuesta en 1905, el mismo año en que explicó el movimiento browniano y describió su teoría de la relatividad especial. Su clave fue la teoría de radiación cuántica de Planck. Debido a que Planck había supuesto que la emisión de luz en cuantos se debía a restricciones en los átomos vibratorios que producían la luz. Esto es: Planck supuso que la energía *en la materia* está cuantizada, pero que la energía radiante es continua. Einstein, por otra parte, atribuyó propiedades cuánticas a la propia luz y vio la radiación como una lluvia de partículas. Este aspecto corpuscular (de partícula) se pone de manifiesto cuando se habla de fotones (en analogía con los electrones, protones y neutrones). Un fotón es absorbido por completo por cada electrón expulsado del metal. La absorción es un proceso absoluto y es inmediato, de modo que no hay un retraso mientras se acumulan "energías ondulatorias".

Una onda de luz tiene un frente amplio, y su energía se dispersa a lo largo de este frente. Para que la onda de luz expulse un solo electrón de una superficie metálica, toda su energía de algún modo tendría que estar concentrada en dicho electrón. Pero esto es tan improbable como una ola en el océano que golpea una roca muy dentro de tierra firme con una energía igual a la de toda la ola. Por tanto, en vez de pensar que la luz encuentra una superficie como un tren continuo de ondas, el efecto fotoeléctrico sugiere concebir que la luz encuentra una superficie o cualquier detector como una sucesión de partículas: fotones. El número de fotones en un haz de luz afecta la intensidad de *todo el haz*, en tanto que la frecuencia de la luz controla la energía de cada *fotón individual*.

Los electrones se sostienen en un metal mediante fuerzas eléctricas de atracción. Para que un electrón deje la superficie se necesita una energía mínima, denominada *función de trabajo*, $W_0$. Un fotón de frecuencia baja con energía menor que $W_0$ no producirá la expulsión de electrones. Sólo un fotón con energía mayor que $W_0$ resulta en el efecto fotoeléctrico. Por ende, la energía del fotón incidente será igual a la energía cinética saliente del electrón más la energía necesaria para sacarlo del metal, $W_0$.

Once años después, el físico estadounidense Robert Millikan demostró, con una verificación experimental, la explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico. Resulta interesante que Millikan haya pasado unos 10 años intentando desaprobar la teoría de Einstein del fotón, sólo para convencerse de ella a consecuencia de sus propios experimentos, por lo que ganó un Premio Nobel. Todos los aspectos de la interpretación de Einstein se confirmaron, incluso la proporcionalidad directa de la energía fotónica y la frecuencia. Fue por esto (y no por su teoría de la relatividad) que Einstein recibió su Premio Nobel. Sorprendentemente, no fue sino hasta 1923, y con el descubrimiento de otras evidencias cuánticas, que los físicos aceptaron en general la existencia del fotón.

El efecto fotoeléctrico demuestra de manera concluyente que la luz tiene propiedades de partícula. El efecto fotoeléctrico no puede concebirse con base en las ondas. Por otra parte, se ha visto que el fenómeno de la interferencia demuestra de un modo convincente que la luz tiene propiedades ondulatorias. No se puede concebir la interferencia en términos de partículas. En la física clásica esto es contradictorio. Desde el punto de vista de la física cuántica, la luz tiene propiedades que recuerdan a ambos. Es "como una onda" o "como una partícula", dependiendo del experimento particular. De modo que la luz se considera ambos, una onda-partícula. ¿Qué tal una "ondícula"? La física cuántica necesita una nueva forma de pensar.

### PUNTO DE CONTROL

1. **¿Una luz más brillante expulsará más electrones desde una superficie fotosensible que una luz más tenue de la misma frecuencia?**
2. **¿Una luz de frecuencia alta expulsará un mayor número de electrones que una luz con frecuencia baja?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sí. El número de electrones expulsados depende del número de fotones incidentes.
2. No necesariamente. La energía (no el número) de los electrones expulsados depende de la frecuencia de los fotones que alumbran. Una fuente brillante de luz azul, por ejemplo, puede expulsar más electrones a una energía más baja que una fuente violeta tenue.

**FIGURA 31.4**
Las celdas solares SunPower sobre el techo del Exploratorium de San Francisco utilizan el efecto fotoeléctrico para satisfacer todas sus demandas de electricidad. Los electrones energizados, en lugar de expulsarse de la superficie, permanecen dentro del material para crear una corriente. Las celdas generan 1.4 megawatts de CD, que se convierten en 1.3 megawatts de CA para usar en el edificio.

## 31.4 Dualidad onda-partícula

La naturaleza de onda y partícula de la luz es evidente en la formación de imágenes ópticas. La imagen fotográfica producida por una cámara se entiende en términos de ondas de luz, que se dispersan desde cada punto del objeto, se refractan conforme pasan a través del sistema de lentes y convergen para enfocarse sobre el medio de registro sensible a la luz, ya sea una película fotográfica o, en una cámara digital, un detector electrónico. La trayectoria de la luz desde el objeto a través del sistema de lentes y hacia el plano focal puede calcularse con el uso de métodos desarrollados a partir de la teoría ondulatoria de la luz.

Pero ahora piensa cuidadosamente en la manera como se forma una imagen sobre la película fotográfica. La película consiste en una emulsión que contiene granos de cristal de haluro de plata, y cada grano contiene alrededor de $10^{10}$ átomos de plata. Cada fotón que se absorbe cede su energía, $hf$, a un solo grano en la emulsión. Esta energía activa los cristales circundantes en todo el grano y se usa en el revelado para completar el proceso fotoquímico. Muchos fotones que activan muchos granos producen la exposición fotográfica habitual. Cuando una fotografía se toma con luz excesivamente débil, se observa que la imagen se constituye de fotones individuales que llegan de manera independiente y parecen tener una distribución aleatoria. Esto se ilustra de un modo espectacular en la Figura 31.5, que muestra cómo avanza una exposición fotón por fotón.

## 31.5 Experimento de la doble rendija

Regresa al experimento de la doble rendija de Thomas Young, que estudiaste en términos de ondas en el Capítulo 29. Recuerda que, cuando luz monocromática pasa por un par de delgadas rendijas estrechamente espaciadas, se produce un patrón de interferencia (Figura 31.6). Ahora considera el experimento en términos de fotones. Supón que atenúas la fuente de luz de modo que, en efecto, sólo un fotón a la vez llega a la barrera con las rendijas delgadas. Si la película detrás de la barrera se expone a la luz durante un tiempo muy corto, la película se expone como se simula en la Figura 31.7a. Cada mancha representa el lugar donde la película se expuso por un fotón. Si se permite que la película se exponga a la luz durante un tiempo más largo, comienza a surgir un patrón de franjas, como en las Figuras 31.7b y 31.7c. ¡Esto es muy sorprendente! ¡Se ve cómo las manchas sobre la película avanzan, fotón por fotón, para formar el mismo patrón de interferencia caracterizado por las ondas!

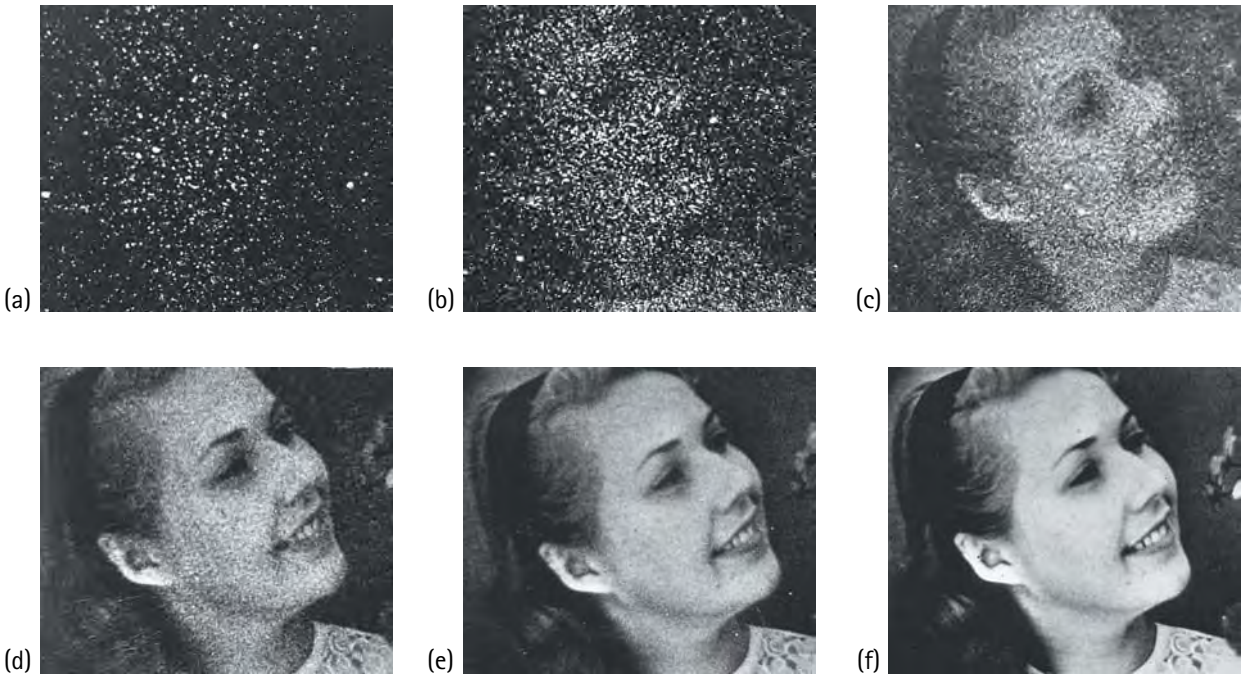



**FIGURA 31.5**
Etapas de la exposición de una película que revelan la producción fotón a fotón de una fotografía. Los números aproximados de fotones en cada etapa son (a) $3 \times 10^3$, (b) $1.2 \times 10^4$, (c) $9.3 \times 10^4$, (d) $7.6 \times 10^5$, (e) $3.6 \times 10^6$, y (f) $2.8 \times 10^7$.

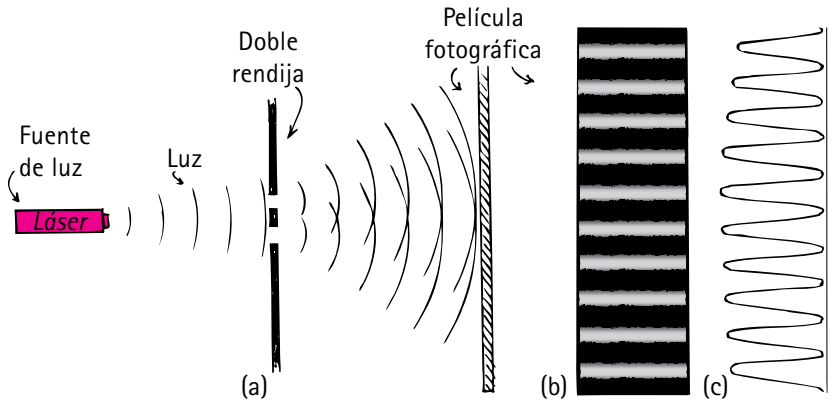



**FIGURA 31.6**
(a) Montaje para el experimento de la doble rendija. (b) Fotografía del patrón de interferencia. (c) Representación gráfica del patrón.

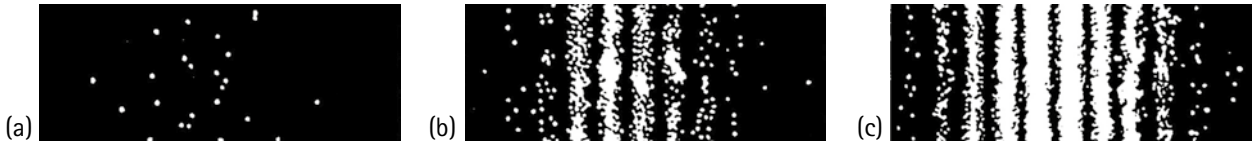



**FIGURA 31.7**
Etapas del patrón de interferencia de la doble rendija. El patrón de granos expuestos individualmente avanza de (a) 28 fotones a (b) 1,000 fotones a (c) 10,000 fotones. Conforme más fotones golpeen la pantalla, aparecerá un patrón de franjas de interferencia.

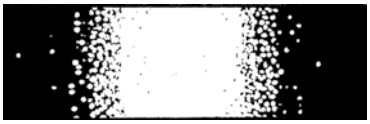


**FIGURA 31.8**
Patrón de difracción de una sola rendija.

Si cubres una rendija de modo que los fotones que golpeen la película fotográfica puedan pasar sólo por una rendija, las pequeñas manchas sobre la película se acumulan y forman un patrón de difracción de una sola rendija (Figura 31.8). ¡Se descubre que los fotones golpean la película en lugares que no golpearían si ambas rendijas estuvieran abiertas! Si pensaras en esto desde un punto de vista clásico, quedarías perplejo y podrías preguntar cómo los fotones que pasan por la única rendija "saben" que la otra rendija está cubierta y, por tanto, forman un abanico para producir el ancho patrón de difracción de una sola rendija. O, si ambas rendijas están abiertas, ¿cómo los fotones que viajan a través de una rendija "saben" que la otra rendija está abierta y evitan ciertas regiones, y sólo avanzan hacia áreas que a final de cuentas llenarán para formar el patrón de interferencia de bandas de doble rendija?[2] La respuesta moderna es que la naturaleza ondulatoria de la luz no es una propiedad promedio determinada que sólo aparece cuando muchos fotones actúan en conjunto. Cada fotón tiene propiedades ondulatorias, así como propiedades de partícula. Pero el fotón despliega diferentes aspectos en distintos momentos. *Un fotón se comporta como partícula cuando se emite por un átomo o lo absorbe una película fotográfica u otro detector, y se comporta como onda cuando viaja de una fuente al lugar donde se detecta.* De modo que el fotón golpea la película como una partícula pero viaja a su posición como una onda que interfiere de manera constructiva. El hecho de que la luz presente comportamientos tanto de onda como de partícula fue una de las interesantes sorpresas de principios del siglo XX. Incluso más sorprendente fue el descubrimiento de que los objetos con masa también muestran un comportamiento dual onda-partícula.

La luz viaja como una onda y golpea como una partícula.

## 31.6 Partículas como ondas: difracción de electrones

Louis De Broglie (1892–1987)

Si un fotón de luz tiene propiedades tanto de onda como de partícula, ¿por qué una partícula material (una con masa) no tiene también propiedades tanto de onda como de partícula? Esta pregunta se la planteó el físico francés Louis de Broglie cuando todavía era un estudiante de posgrado en 1924. Su respuesta constituyó su tesis doctoral en física, que luego le hizo acreedor al Premio Nobel de Física. De acuerdo con De Broglie, toda partícula de materia está dotada, de alguna forma, con una onda para guiarla mientras viaja. Entonces, bajo las condiciones adecuadas, toda partícula producirá un patrón de interferencia o de difracción. Todo cuerpo (ya sea un electrón, un protón, un átomo, un ratón, tú, un planeta, una estrella) tiene una longitud de onda que se relaciona con su cantidad de movimiento mediante

$$\text{Longitud de onda} = \frac{h}{\text{cantidad de movimiento}}$$

donde $h$ es la constante de Planck. Un cuerpo con masa grande y rapidez ordinaria tiene una longitud de onda tan pequeña que la interferencia y la difracción son despreciables; las balas de los fusiles vuelan recto y no acribillan a sus blancos en toda su extensión con parches de interferencia detectables.[3] Pero, en el caso de partículas más pequeñas, como los electrones, la difracción puede ser considerable.

**SCREENCAST: Difracción de partículas**

[2]Desde un punto de vista precuántico, esta dualidad onda-partícula de hecho es misteriosa. Esto condujo a algunas personas a creer que los cuantos tienen una especie de conciencia, que cada fotón o electrón tiene "una mente propia". Sin embargo, el misterio es como la belleza. Está en la mente de quien la observa y no en la naturaleza en sí. Los científicos proponen modelos para comprender la naturaleza y, cuando surgen inconsistencias, se mejoran o cambian los modelos. La dualidad onda-partícula de la luz no encaja en un modelo construido sobre ideas clásicas. Otro modelo es que los cuantos tienen mentes propias. Otro modelo es la física cuántica. En este libro se está de acuerdo con la última.

[3]Una bala de 0.02 kg de masa que viaja a 330 m/s, por ejemplo, tiene una longitud de onda de De Broglie cuyo

$$\frac{h}{mv} = \frac{6.6 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s}}{(0.02\ \text{kg})(330\ \text{m/s})} = 10^{-34}\,\text{m}$$

tamaño es increíblemente pequeño, un millón de millón de millón de millonésima del tamaño de un átomo de hidrógeno. Por otra parte, un electrón que viaja a 2% de la rapidez de la luz tiene una longitud de onda de $10^{-10}$ m, que es igual al diámetro del átomo de hidrógeno. Los efectos de la difracción para los electrones son mensurables, en tanto que los efectos de la difracción para las balas no lo son.

**FIGURA 31.9**
Franjas producidas por la difracción de la luz.

Tanto un haz de electrones como un haz de fotones pueden difractarse de la misma forma. Los haces de electrones dirigidos a través de rendijas dobles también presentan patrones de interferencia similares a los de la Figura 31.9. El experimento de la doble rendija estudiado en la sección anterior puede realizarse con electrones, así como con fotones. Para los electrones el aparato es más complejo, pero el procedimiento es en esencia el mismo. La intensidad de la fuente puede reducirse para dirigir los electrones uno a la vez a través de un montaje de doble rendija, lo que produce los mismos resultados sorprendentes que con los fotones. Al igual que los fotones, los electrones golpean la pantalla como si fueran partículas, pero el *patrón* de llegada es como el de una onda. La desviación angular de los electrones para formar el patrón de interferencia coincide perfectamente con los cálculos que utilizan la ecuación de De Broglie para la longitud de onda de un electrón.

En la Figura 31.11 se ve otro ejemplo de difracción de electrones, con el uso de un microscopio electrónico estándar. El haz de electrones con una densidad de corriente muy baja se dirige a través de un biprisma electrostático que difracta el haz. Un patrón

**FIGURA 31.10**
El microscopio electrónico le da un uso práctico a la naturaleza ondulatoria de los electrones. La longitud de onda del haz de electrones por lo general es miles de veces más corta que la longitud de onda de la luz visible, de modo que el microscopio electrónico puede distinguir detalles que no son visibles con los microscopios ópticos.

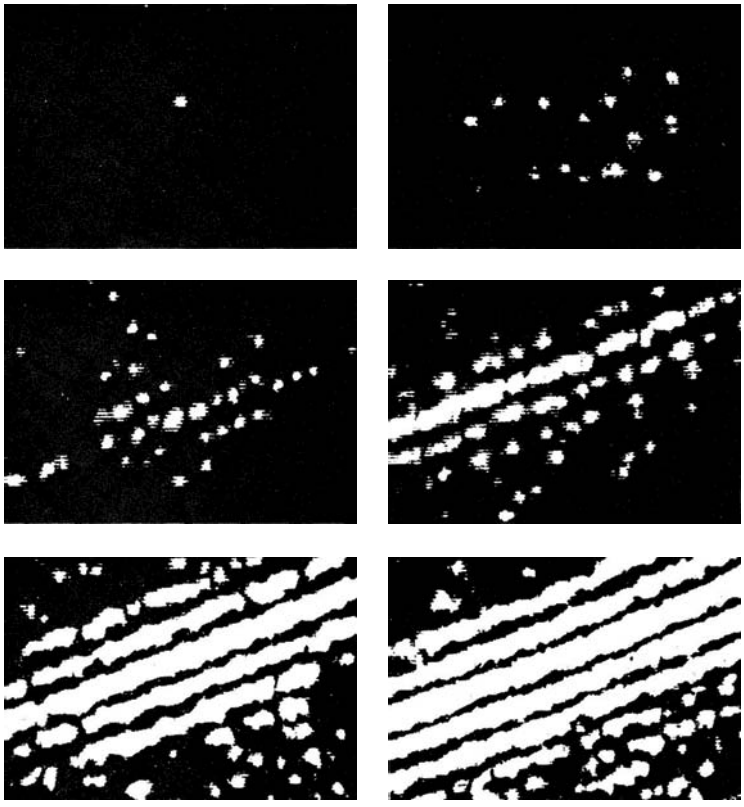
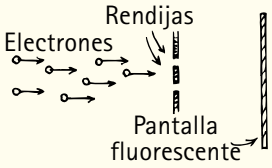


**FIGURA 31.11**
Patrones de interferencia electrónica grabados de un monitor de televisión, que muestran la difracción de un haz de electrones de muy baja intensidad a través de un biprisma electrostático.

**FIGURA 31.12**
Detalle de la cabeza de un mosquito hembra visto con un microscopio electrónico de barrido a una "baja" amplificación de 200×.

**PUNTO DE CONTROL**




1. **Si los electrones se comportaran sólo como partículas, ¿qué patrón esperarías sobre la pantalla después de que los electrones pasaran por la doble rendija?**
2. **No percibes la longitud de onda de De Broglie para una pelota de béisbol lanzada. ¿Esto se debe a que la longitud de onda es muy grande o a que es muy pequeña?**
3. **Si un electrón y un protón tienen la misma longitud de onda de De Broglie, ¿cuál partícula tiene mayor rapidez?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Si los electrones se comportaran sólo como partículas, formarían dos bandas, como se indica en (a). Debido a su naturaleza ondulatoria, en realidad producen el patrón que se muestra en (b).

2. Uno no percibe la longitud de onda de una pelota de béisbol lanzada porque es en extremo pequeña, unas $10^{20}$ veces más pequeña que el núcleo atómico.
3. La misma longitud de onda significa que las dos partículas tienen la misma cantidad de movimiento. Esto significa que el electrón que es menos masivo debe viajar más rápido que el protón que es más pesado.

de franjas producidas por cada uno de los electrones se acumula paso a paso y se muestra en un monitor de televisión. La imagen se llena de manera gradual con electrones y produce el patrón de interferencia que suele asociarse a las ondas. La dualidad onda-partícula no se limita a fotones y electrones. Neutrones, protones, átomos enteros y, en un grado incalculable, incluso las balas de un fusil con gran rapidez muestran una dualidad de comportamiento de partícula y de onda.

## 31.7 Principio de incertidumbre

**SCREENCAST: Incertidumbre cuántica**

La dualidad onda-partícula de los cuantos ha inspirado interesantes debates sobre los límites de la capacidad humana para medir con exactitud las propiedades de los objetos pequeños. Las discusiones se centran en la idea de que el acto de medir afecta la cantidad que se va a medir.

Por ejemplo, se sabe que, si colocas un termómetro frío en una taza de café caliente, la temperatura del café se altera pues éste cede calor al termómetro. El dispositivo de medición altera la cantidad que se va a medir. Pero estos errores de medición pueden corregirse si conoces la temperatura inicial del termómetro, las masas y calores específicos involucrados, y así sucesivamente. Dichas correcciones entran muy bien dentro del dominio de la física clásica; *no* son las incertidumbres de la física cuántica. Las incertidumbres cuánticas surgen de la naturaleza ondulatoria de la materia. Una onda, por su propia naturaleza, ocupa un espacio determinado y dura un tiempo definido. No puede apretujarse en un punto en el espacio o limitarse a un solo instante porque entonces no sería una onda. Esta "imprecisión" inherente de una onda otorga una imprecisión o incertidumbre en la medición a nivel cuántico. Innumerables experimentos han demostrado que cualquier medición que sondee de alguna manera un sistema, necesariamente perturba al sistema por al menos un cuanto de acción, $h$, la constante de Planck. De modo que cualquier medición que involucre una interacción entre el observador y lo que se mide está sujeta a esta mínima inexactitud.

Hay que distinguir entre observar y sondear. Piensa en una taza de café al otro lado de la habitación. Si la observas de un modo pasivo y ves que de ella sale vapor, este acto de "medición" no involucra interacción física entre tus ojos y el café. Tu mirada ni agrega ni quita energía al café. Puedes afirmar que está caliente sin *sondearla*. Colocar un termómetro en su interior es otra historia. Interactúas físicamente con el café y, por tanto, lo sometes a una alteración. Sin embargo, la aportación cuántica a esta alteración es eclipsada completamente por las incertidumbres clásicas y es despreciable. Las incertidumbres cuánticas son significativas sólo en los ámbitos atómico y subatómico.

Compara el acto de hacer mediciones de una pelota de béisbol lanzada y de un electrón. Puedes medir la rapidez de una pelota de béisbol lanzada si la haces volar a través de un par de sensores fotoeléctricos de barrera que estén separados una distancia conocida (Figura 31.13). La pelota se cronometra cuando interrumpe los haces de luz de los sensores. La exactitud en la medición de la rapidez de la pelota tiene que ver con incertidumbres en la distancia medida entre los sensores y en los mecanismos de cronometrado. Las interacciones entre la pelota macroscópica y los fotones que encuentra son insignificantes.

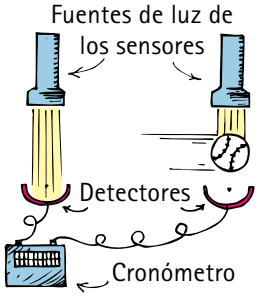



**FIGURA 31.13**
Para medir la rapidez de la pelota se divide la distancia que hay entre los sensores entre la diferencia de tiempo que tarda en cruzar las dos trayectorias de luz. Los fotones que golpean la pelota alteran su movimiento mucho menos de lo que un grupo de moscas alteran el movimiento de un supertanque petrolero cuando saltan sobre él.

Pero no es así cuando se trata de medir cosas submicroscópicas, como los electrones. Incluso un solo fotón que rebote en un electrón altera mucho el movimiento del electrón, y en una forma impredecible. Si quieres observar un electrón y determinar su paradero con luz, la longitud de onda de la luz tendría que ser muy corta. Te enfrentas a un dilema. La luz con una longitud de onda corta, que puede "ver" mejor al pequeño electrón, corresponde a un gran cuanto de energía que, a su vez, altera enormemente el estado de movimiento del electrón. Si, por otra parte, usas una longitud de onda grande que corresponde a un cuanto de energía más pequeño, el cambio que induces en el estado de movimiento del electrón será menor, pero la determinación de su posición por medio de la onda más burda será menos exacta. El acto de observar algo tan pequeño como un electrón sondea al electrón y, al hacerlo, produce una incertidumbre considerable en su posición o en su movimiento. Si bien esta incertidumbre es por completo despreciable cuando se mide la posición y el movimiento de los objetos cotidianos (macroscópicos), es un hecho predominante de la vida en el ámbito atómico.

La incertidumbre de las mediciones en el ámbito atómico, que por primera vez fueron establecidas matemáticamente por el físico alemán Werner Heisenberg, se denomina **principio de incertidumbre**. Es un principio fundamental de la mecánica cuántica. Heisenberg descubrió que, cuando se multiplican las incertidumbres en las mediciones de la cantidad de movimiento y la posición de una partícula, el producto debe ser igual a o mayor que la constante de Planck, $h$, dividida entre $2\pi$, que se representa como $\hbar$ (llamada *h-barra*).[4] El principio de incertidumbre se enuncia en una fórmula simple:

$$\Delta p \, \Delta x \geq \hbar$$

**SCREENCAST: El principio de incertidumbre**

Werner Heisenberg (1901-1976)

[4]El físico cuántico Ken Ford homenajea a $\hbar$ en el número de placa de su Honda Civic híbrido (página 375).

¡Nunca puedes cambiar sólo una cosa! Toda ecuación te recuerda esto: no puedes cambiar un término en un lado sin afectar el otro lado.

Aquí, Δ significa "incertidumbre de": $\Delta p$ es la incertidumbre de la cantidad de movimiento (por convención, el símbolo para cantidad de movimiento es $p$) y $\Delta x$ es la incertidumbre de la posición. El producto de estas dos incertidumbres debe ser igual a o mayor que ($\geq$) el tamaño de $\hbar$. Para incertidumbres mínimas, el producto será igual a $\hbar$; el producto de incertidumbres más grandes será mayor que $\hbar$. Pero en ningún caso el producto de las incertidumbres será menor que $\hbar$. La importancia del principio de incertidumbre es que, incluso en las mejores condiciones, el límite inferior de incertidumbre es $\hbar$. Esto significa que, si quieres conocer la cantidad de movimiento de un electrón con gran exactitud (pequeña $\Delta p$), la incertidumbre correspondiente en la posición será grande. O, si quieres conocer la posición con gran exactitud (pequeña $\Delta x$), la incertidumbre correspondiente en la cantidad de movimiento será grande. Cuanto más precisa sea una de estas cantidades, menos precisa será la otra.[5]

El principio de incertidumbre funciona de manera similar con la energía y el tiempo. No puedes medir la energía de una partícula con completa precisión en un tiempo infinitesimalmente corto. La incertidumbre en el conocimiento de la energía, $\Delta E$, y el tiempo que toma medir la energía, $\Delta t$, se relacionan mediante la expresión[6]

$$\Delta E \, \Delta t \geq \hbar$$

La mayor exactitud que se puede esperar jamás obtener es cuando el producto de las incertidumbres de energía y tiempo es igual a $\hbar$. Cuanto mayor sea la exactitud con que determines la energía de un fotón, un electrón o una partícula de cualquier tipo, mayor será la incertidumbre en cuanto al tiempo durante el cual tiene dicha energía.

El principio de incertidumbre es relevante sólo para fenómenos cuánticos. La falta de exactitud cuando se mide la posición y la cantidad de movimiento de una pelota de béisbol y que se debe a efectos cuánticos es por completo despreciable. Pero las imprecisiones cuando se mide la posición y la cantidad de movimiento de un electrón están lejos de ser despreciables. Esto se debe a que las incertidumbres en las mediciones de estas cantidades subatómicas son similares a las magnitudes de las cantidades mismas.[7]

Hay un peligro al aplicar el principio de incertidumbre en áreas fuera de la mecánica cuántica. Algunas personas concluyen por afirmaciones sobre la interacción entre el observador y lo observado que el Universo no existe "ahí afuera", independiente de todos los actos de observación, y que la realidad la crea el observador. Otros interpretan el principio de incertidumbre como el escudo con el que la naturaleza se protege de secretos vedados. Algunos críticos de la ciencia utilizan el principio de incertidumbre como evidencia de que la ciencia en sí es incierta. La realidad del Universo (ya sea observada o no), de los secretos de la naturaleza y de las incertidumbres de la ciencia tienen muy poco que ver con el principio de incertidumbre de Heisenberg. La profundidad del principio de incertidumbre tiene que ver con la interacción inevitable entre la naturaleza al nivel atómico y los medios que tienen los investigadores para sondearla.

[5]En un mundo hipotético meramente clásico, $\hbar$ sería cero y las incertidumbres tanto de posición como de cantidad de movimiento podrían ser arbitrariamente pequeñas. En el mundo real, la constante de Planck es mayor que cero y, en principio, no se pueden conocer simultáneamente ambas cantidades con certeza.

[6]Puedes ver que esto es congruente con la incertidumbre en la cantidad de movimiento y en la posición. Recuerda que Δ cantidad de movimiento = fuerza × tiempo y que Δ energía = fuerza × Δ distancia. Entonces:

$$\begin{aligned}\hbar &= \Delta \text{ cantidad de movimiento} \times \Delta \text{ distancia} \\ &= (\text{fuerza} \times \Delta \text{ distancia}) \times \Delta \text{ tiempo} \\ &= \Delta \text{ energía} \times \Delta \text{ tiempo}\end{aligned}$$

[7]Las incertidumbres en las mediciones de la cantidad de movimiento, la posición, la energía o el tiempo que se relacionan con el principio de incertidumbre para una pelota de béisbol lanzada son sólo 1 parte en más o menos 10 mil billones de trillones ($10^{-34}$). Los efectos cuánticos son despreciables incluso en el caso de la bacteria más indolente, donde las incertidumbres son de más o menos 1 parte en mil millones ($10^{-9}$). Los efectos cuánticos se vuelven evidentes en el caso de los átomos, donde las incertidumbres pueden ser de hasta 100%. En lo que se refiere a los electrones que se mueven en un átomo, las incertidumbres cuánticas dominan, y estás en el ámbito cuántico a gran escala.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿El principio de incertidumbre de Heisenberg es aplicable al caso práctico de usar un termómetro para medir la temperatura de un vaso con agua?**
2. **Un contador Geiger mide el decaimiento radiactivo al registrar los pulsos eléctricos producidos en un tubo de gas cuando partículas de alta energía pasan a través de él. Las partículas emanan de una fuente radiactiva (por decir, radio). ¿El acto de medir la tasa de decaimiento radiactivo del radio altera al radio o a su tasa de decaimiento?**
3. **¿El principio cuántico de que uno no puede observar algo sin cambiarlo puede extrapolarse razonablemente para sustentar la afirmación de que puedes hacer que un extraño dé la vuelta y te mire, si lo miras atentamente en la espalda?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. No. Si bien es probable que sometas la temperatura del agua a un cambio por el hecho de sondearla con un termómetro, en especial uno mucho más frío o más caliente que el agua, las incertidumbres que se relacionan con la precisión del termómetro están dentro del dominio de la física clásica. La importancia de las incertidumbres en el nivel subatómico no es aplicable aquí.
2. No en absoluto, porque la interacción involucrada está entre el contador Geiger y las partículas, no entre el contador Geiger y el radio. El comportamiento de las partículas es el que se altera por la medición, no el radio del cual emana. Fíjate cómo se relaciona esto con la siguiente pregunta.
3. No. Aquí debes tener mucho cuidado de definir qué se entiende por *observar.* Si la observación involucra un sondeo (dar o extraer energía), sí se cambia en cierto grado lo que se observa. Por ejemplo, si alumbras con una fuente luminosa la espalda de la persona, la observación consiste en un sondeo, el cual, por ligero que sea, altera físicamente la configuración de los átomos en su espalda. Si la persona percibe esto, podría voltear. Pero sólo mirar atentamente su espalda es observar en el sentido pasivo. La luz que recibes (o bloqueas con tu parpadeo, por ejemplo) ya abandonó su espalda. De modo que, ya sea que mires fijamente, guiñas o cierres los ojos por completo, en ninguna forma física alteras la configuración atómica de su espalda. Alumbrar con una luz o sondear algo no es lo mismo que mirarlo pasivamente. La imposibilidad de distinguir entre *sondear* y *observar pasivamente* está en la raíz de muchos disparates que se dicen y de los que se afirma que están sustentados por la física cuántica. Una mejor manera de apoyar la afirmación anterior sería con resultados positivos obtenidos con una prueba simple y práctica, en vez de afirmar que se basa en la teoría cuántica, que se ha ganado su reputación con tanto esfuerzo.

## 31.8 Complementariedad

El reino de la física cuántica parece confuso. Las ondas de luz que interfieren y se difractan suministran su energía en paquetes de cuantos: partículas. Los electrones que se mueven por el espacio en líneas rectas y experimentan colisiones como si fuesen partículas se distribuyen espacialmente en patrones de interferencia como si fueran ondas. En esta confusión, hay un orden subyacente. ¡El comportamiento de la luz y los electrones es confuso en la misma manera! La luz y los electrones muestran ambos características de onda y de partícula.

El físico danés Niels Bohr, uno de los fundadores de la física cuántica, formuló una expresión explícita de la totalidad inherente en este dualismo. Él llamó a su

Niels Bohr (1885-1962)

expresión de esta totalidad, **complementariedad**. Como Bohr lo expresó, los fenómenos cuánticos muestran propiedades de complementariedad (mutuamente excluyente), y aparecen como partículas o como ondas, dependiendo del tipo de experimento realizado. Los experimentos diseñados para examinar intercambios individuales de energía y cantidad de movimiento revelan propiedades de partícula, en tanto que los experimentos concebidos para examinar la distribución espacial de la energía revelan propiedades ondulatorias. Las propiedades ondulatorias y las de partícula de la luz se complementan entre sí: ambas son necesarias para la comprensión de la "luz". Cuál parte se enfatiza, depende de qué pregunta plantee uno a la naturaleza.

La complementariedad no es un compromiso, y no significa que toda la verdad acerca de la luz se encuentre en alguna parte entre las partículas y las ondas. Más bien es como ver los lados de un cristal. Lo que ves depende de qué faceta estés mirando, razón por la cual la luz, la energía y la materia parecen comportarse como cuantos en algunos experimentos y como ondas en otros.

La idea de que los opuestos son componentes de una totalidad no es nueva. Las antiguas culturas orientales la incorporaron como una parte integral de su cosmovisión. Esto se demuestra en el diagrama yin-yang del T'ai Chi Tu (Figura 31.14). Un lado del círculo se llama *yin* (negro) y el otro lado se llama *yang* (blanco). Donde hay yin, hay yang. Sólo la unión de yin y yang forma un todo. Donde hay bajo, también hay alto. Donde hay noche, también hay día. Donde hay nacimiento, también hay muerte. Una persona completa integra yin (rasgos femeninos, cerebro derecho, emoción, intuición, oscuridad, frío, humedad) con yang (rasgos masculinos, cerebro izquierdo, razón, lógica, luz, calor, sequedad). Cada una tiene aspectos del otro. Para Niels Bohr, el diagrama yin-yang simbolizaba el principio de complementariedad. Al final de su vida, Bohr escribió ampliamente sobre las repercusiones de la complementariedad. En 1947, cuando fue nombrado caballero por sus aportaciones a la física, eligió para su escudo de armas el símbolo del yin-yang.

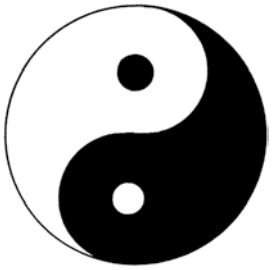


**FIGURA 31.14**
Los opuestos se ven como complementos mutuos en el símbolo del yin-yang de las culturas orientales.

## PREDICTIBILIDAD Y CAOS

Puedes hacer predicciones de un sistema ordenado cuando conoces las condiciones iniciales. Por ejemplo, puedes establecer con precisión dónde aterrizará un cohete lanzado, dónde estará un planeta dado en un momento particular, o cuándo ocurrirá un eclipse. Éstos son ejemplos de acontecimientos en el macromundo newtoniano. De un modo similar, en el micromundo cuántico, puedes predecir dónde es *probable* que esté un electrón en un átomo y la *probabilidad* de que una partícula radiactiva decaiga en un intervalo dado. La predictibilidad en los sistemas ordenados, tanto newtonianos como cuánticos, depende del conocimiento de las condiciones iniciales.

Sin embargo, algunos sistemas, ya sean newtonianos o cuánticos, no son ordenados: son inherentemente impredecibles. A éstos se les denomina "sistemas caóticos". El flujo de agua turbulento es un ejemplo. Sin importar con cuánta precisión se conozcan las condiciones iniciales de un pedazo de madera que flota al tiempo que fluye corriente abajo, no puedes predecir su ubicación más tarde corriente abajo. Una característica de los sistemas caóticos es que una pequeña diferencia en las condiciones iniciales ocasiona resultados posteriores muy diferentes. Dos pedazos idénticos de madera apenas separados un poco en un momento pueden estar muy separados poco tiempo después.

El clima es caótico. Pequeños cambios en el clima de un día pueden producir grandes (y enormemente impredecibles) cambios una semana después. Los meteorólogos hacen su mejor esfuerzo, pero se enfrentan al hecho concreto del caos en la naturaleza. Esta barrera para la predicción exacta condujo al meteorólogo Edward Lorenz a

preguntar: "¿El aleteo de una mariposa en Brasil provoca un tornado en Texas?" Ahora se habla del *efecto mariposa* cuando uno lidia con situaciones en las que efectos muy pequeños pueden amplificarse y convertirse en efectos muy grandes.

Es interesante que el caos no sea todo impredecibilidad desesperanzada. Aun en un sistema caótico puede haber patrones de regularidad. Existe *orden en el caos*. Los científicos han aprendido cómo tratar el caos matemáticamente y cómo encontrar las partes de él que son ordenadas. Los artistas buscan patrones en la naturaleza de un modo distinto. Tanto científicos como artistas buscan conexiones en la naturaleza que siempre han estado ahí pero que todavía no se unen en el pensamiento humano.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Cuanto.** Del latín *quantus*, que significa "cuanto". Un cuanto es una unidad elemental de una cantidad, una cantidad discreta de algo. Un cuanto de energía electromagnética se llama fotón.

**Física cuántica.** La física que describe el micromundo, donde muchas cantidades son granulares (en unidades llamadas *cuantos*), no continuas, y donde las partículas de luz (*fotones*) y las partículas de materia (como los electrones) muestran propiedades tanto de onda como de partícula.

**Constante de Planck.** Una constante fundamental, $h$, que relaciona la energía de los cuantos de luz con su frecuencia:

$$h = 6.6 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$$

**Efecto fotoeléctrico.** La emisión de electrones de una superficie metálica cuando la luz alumbra sobre ella.

**Principio de incertidumbre.** El principio, formulado por Werner Heisenberg, que afirma que la constante de Planck, $h$, establece un límite sobre la exactitud de una medición. De acuerdo con el principio de incertidumbre, no es posible medir de manera exacta tanto la posición como la cantidad de movimiento de una partícula al mismo tiempo, ni la energía y el tiempo durante el cual la partícula tiene dicha energía.

**Complementariedad.** El principio, enunciado por Niels Bohr, que afirma que los aspectos de onda y de partícula tanto de la materia como de la radiación son partes necesarias y complementarias del todo. Cuál parte se enfatiza depende de qué experimento se realiza (es decir, de qué pregunte uno a la naturaleza).

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 31.1 El nacimiento de la teoría cuántica

1. ¿Cuál teoría de la luz, la teoría ondulatoria o la teoría corpuscular, apoyaron los hallazgos de Young, Maxwell y Hertz?
2. ¿El efecto fotoeléctrico respalda la teoría ondulatoria o la teoría corpuscular de la luz?
3. ¿Exactamente qué consideró Max Planck que estaba cuantizado: la energía de los átomos en vibración o la energía de la luz en sí?

### 31.2 Cuantización y la constante de Planck

4. ¿Cómo se le llama a un cuanto de luz?
5. En la fórmula $E = hf$, ¿la $f$ representa la frecuencia de la onda, tal como se definió en el Capítulo 19?
6. ¿Cuál tiene los cuantos con energía más baja: la luz roja o la luz azul? ¿Las ondas de radio o los rayos X?

### 31.3 Efecto fotoeléctrico

7. ¿Cuáles logran desalojar mejor electrones de una superficie metálica: los fotones de luz violeta o los fotones de luz roja? ¿Por qué?
8. ¿Por qué un haz muy brillante de luz roja no impartirá más energía a un electrón expulsado que un haz tenue de luz violeta?

### 31.4 Dualidad onda-partícula

9. ¿Por qué las fotografías de un libro o revista se ven granulosas cuando se amplifican?
10. ¿La luz se comporta principalmente como onda o como partícula cuando interactúa con los cristales de materia en las películas fotográficas?

### 31.5 Experimento de la doble rendija

11. ¿La luz viaja de un lugar a otro en forma de onda o de partícula?
12. ¿La luz interactúa con un detector en forma de onda o de partícula?
13. ¿Cuándo se comporta la luz como onda? ¿En qué momento se comporta como partícula?

### 31.6 Partículas como ondas: difracción de electrones

14. ¿Qué evidencia puedes citar de la naturaleza ondulatoria de las partículas?
15. Cuando los electrones se difractan por una doble rendija, ¿golpean la pantalla en forma de onda o en forma de partícula? ¿El patrón de golpes es como el de una onda o como el de una partícula?

### 31.7 Principio de incertidumbre

16. ¿En cuál de los siguientes las incertidumbres cuánticas son significativas: medir simultáneamente la rapidez y la posición de una pelota de béisbol; de una pelotita de papel mascado; de un electrón?
17. ¿Cuál es el principio de incertidumbre con respecto a la cantidad de movimiento y a la posición?
18. Si las mediciones muestran una posición precisa para un electrón, ¿dichas mediciones pueden mostrar también una cantidad de movimiento preciso?
19. Si una medición muestra un valor preciso para la energía radiada por un electrón, ¿dicha medición también muestra un tiempo preciso para este evento?
20. ¿Cuál es la diferencia, en este libro, entre observar un evento de manera pasiva y activa?

### 31.8 Complementariedad

21. ¿Qué es el principio de complementariedad?
22. Cita una evidencia de que la idea de los opuestos como componentes de una totalidad precedió al principio de complementariedad de Bohr.

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

23. Una longitud de onda típica de radiación infrarroja emitida por tu cuerpo es de 25 mm ($2.5 \times 10^{-2}$ m). Demuestra que la energía por fotón de tal radiación es de aproximadamente $8.0 \times 10^{-24}$ J.
24. Considera la longitud de onda de De Broglie de un electrón que golpea la cara posterior de uno de los primeros modelos de pantalla de televisión a 1/10 la rapidez de la luz. Demuestra que la longitud de onda del electrón es $2.4 \times 10^{-11}$ m.
25. Decides poner a rodar una bola de 0.1 kg por el suelo tan lentamente que tendrá una pequeña cantidad de movimiento y una gran longitud de onda de De Broglie. Si la ruedas a 0.001 m/s, ¿cuál es su longitud de onda? ¿Cómo se compara esto con la longitud de onda de De Broglie del electrón de alta rapidez del problema anterior?

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

26. ¿Qué se entiende cuando se dice que algo está *cuantizado*?
27. Distingue entre la física clásica y la física cuántica.
28. En el Capítulo 30 aprendiste la fórmula $E \sim f$. En este capítulo aprendiste la fórmula $E = hf$. Explica la diferencia entre estas dos fórmulas. ¿Qué es $h$?
29. La frecuencia de la luz violeta es cerca del doble de la de la luz roja. ¿Cómo se compara la energía de un fotón violeta con la energía de un fotón rojo?
30. ¿Cuál tiene más energía: un fotón de luz visible o un fotón de luz ultravioleta?
31. Se habla de fotones de luz roja y fotones de luz verde. ¿Puedes hablar de fotones de luz blanca? ¿Por qué sí o por qué no?
32. ¿Cuál haz láser porta más energía por fotón: un haz rojo o un haz verde?
33. Si un haz de luz roja y un haz de luz azul tienen exactamente la misma energía, ¿cuál haz contiene mayor número de fotones?
34. En el efecto fotoeléctrico, ¿la intensidad o la frecuencia determina la energía cinética de los electrones expulsados? ¿Cuál determina el número de electrones expulsados?
35. Una fuente muy brillante de luz roja tiene mucha más energía que una fuente tenue de luz azul, pero la luz roja no tiene capacidad para expulsar electrones de una determinada superficie fotosensible. ¿Por qué esto es así?
36. ¿Por qué los fotones ultravioleta son más efectivos para inducir el efecto fotoeléctrico que los fotones de luz visible?
37. ¿Por qué la luz que golpea una superficie metálica expulsa sólo electrones y no protones?
38. ¿El efecto fotoeléctrico depende principalmente de la naturaleza ondulatoria o de la naturaleza corpuscular de la luz?
39. Explica cómo se usa el efecto fotoeléctrico para abrir puertas automáticas cuando alguien se aproxima.
40. Explica en forma breve cómo se usa el efecto fotoeléctrico en el funcionamiento de al menos dos de los siguientes: un ojo eléctrico, el exposímetro de un fotógrafo, la pista sonora de una película predigital.
41. Si alumbras con luz ultravioleta la bola metálica de un electroscopio con carga negativa (que se muestra en las preguntas 56 y 57 del Capítulo 22), se descargará. Pero si el electroscopio tiene carga positiva, no se descargará. ¿Puedes atreverte a dar una explicación?
42. ¿La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico invalida la explicación de Young del experimento de la doble rendija? Explica.
43. La cámara que tomó la fotografía del rostro de la mujer (Figura 31.5) tenía lentes ordinarios que se sabe bien que refractan ondas. Sin embargo, la formación paso a paso de la imagen es evidencia de la presencia de fotones. ¿Cómo puede ser esto? ¿Cuál es tu explicación?
44. ¿Qué evidencia puedes citar de la naturaleza ondulatoria de la luz? ¿De la naturaleza corpuscular de la luz?
45. ¿En qué momento un fotón se comporta como onda? ¿En qué momento se comporta como partícula?
46. Se ha argumentado que la luz es una onda y luego una partícula, y así sucesivamente. ¿Esto indica que la verdadera naturaleza de la luz probablemente se encuentre en alguna parte entre estos dos modelos?
47. ¿Qué aparato de laboratorio aprovecha la naturaleza ondulatoria de los electrones?
48. ¿Cómo es que un átomo puede obtener suficiente energía para ionizarse?
49. Un fotón de rayos X puede golpear un electrón sin que el electrón recoja *toda* la energía del fotón. Plantea una hipótesis acerca de la frecuencia del fotón que "abandona la escena" de la colisión. (Este fenómeno se conoce como *efecto Compton*.)
50. Un átomo de hidrógeno y un átomo de uranio se mueven con la misma rapidez. ¿Cuál posee más cantidad de movimiento? ¿Cuál tiene una longitud de onda más larga?
51. Si una bala de cañón y el proyectil de una carabina de aire comprimido tienen la misma rapidez, ¿cuál tiene la longitud de onda más larga?
52. ¿Cuál es la principal ventaja que tiene un microscopio electrónico sobre un microscopio óptico?
53. ¿Un haz de protones en un "microscopio protónico" mostraría mayor o menor difracción que los electrones con la misma rapidez en un microscopio electrónico? Defiende tu respuesta.
54. Imagina que la naturaleza fuera por completo diferente y que se necesitara un número infinito de fotones para constituir incluso la más pequeña cantidad de energía radiante, que la longitud de onda de las partículas materiales fuera cero, que la luz no tuviera propiedades de partícula y la materia no tuviera propiedades de onda.

Éste sería el mundo clásico descrito por la mecánica de Newton y la electricidad y el magnetismo de Maxwell. ¿Cuál sería el valor de la constante de Planck para tal mundo sin efectos cuánticos?

55. Considera uno de los muchos electrones que hay sobre la punta de tu nariz. Si alguien la mira, ¿su movimiento se alteraría? ¿Y si la ve con un ojo cerrado? ¿Con los dos ojos abiertos, pero cruzados? ¿Aquí se aplica el principio de incertidumbre de Heisenberg?
56. ¿El principio de incertidumbre te dice que nunca puedes conocer algo con certeza?
57. ¿Alteras inadvertidamente las realidades que intentas medir en una encuesta de opinión pública? ¿Aquí se aplica el principio de incertidumbre de Heisenberg?
58. Si el comportamiento de un sistema se midió con exactitud durante determinado periodo y se entendió, entonces, ¿el comportamiento futuro de dicho sistema puede predecirse con exactitud? (¿Hay alguna diferencia entre las propiedades que son *mensurables* y las propiedades que son *predecibles*?)
59. Cuando verificas la presión de los neumáticos, algo de aire escapa. ¿Por qué el principio de incertidumbre no se aplica aquí?
60. Si una mariposa causa un tornado, ¿tiene sentido erradicar a las mariposas? Defiende tu respuesta.
61. ¿Has escuchado la expresión "dar un salto cuántico" para describir grandes cambios? ¿La expresión es adecuada? Defiende tu respuesta.
62. Para medir la edad exacta del viejo Matusalén, el árbol vivo más antiguo del mundo, un profesor de dendrología en Nevada, auxiliado por un empleado de la U.S. Bureau of Land Management, derribó el árbol en 1965 y contó sus anillos. ¿Este es un ejemplo extremo de alterar lo que mides o un ejemplo de mala conducta académica?

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

63. Una de las dificultades técnicas que enfrentaron los que crearon la televisión a color fue el diseño de un tubo de imagen (cámara) para la porción roja de la imagen. En términos de energía, discute por qué encontrar un material que respondiera a la luz roja era más difícil que encontrar materiales que respondieran a las luces verde y azul.
64. Los fósforos dentro de las lámparas fluorescentes convierten la luz ultravioleta en luz visible. Discute la ausencia de sustancias que convierten la luz visible en luz ultravioleta.
65. El bromuro de plata (AgBr) es una sustancia sensible a la luz utilizada en algunos tipos de película fotográfica. Para producir la exposición de la película, ésta debe iluminarse con luz que tenga suficiente energía como para separar las moléculas. Discute la razón por la cual esta película podría manejarse sin exponerse en una habitación oscura iluminada con luz roja. ¿Y qué hay de una luz azul? ¿Y de luz roja muy brillante en relación con luz azul muy tenue?
66. Las quemaduras solares producen daño celular en la piel. ¿Por qué la radiación ultravioleta puede producir este daño, en tanto que la radiación visible, que es incluso más intensa, no lo produce?
67. Discute cómo la lectura del medidor de la Figura 31.1 variará a medida que la placa fotosensible se ilumine con luz de varios colores con una intensidad determinada y con luz de varias intensidades de un color determinado.
68. ¿El efecto fotoeléctrico *demuestra* que la luz está hecha de partículas? ¿Los experimentos de interferencia *demuestran* que la luz está compuesta de ondas? (¿Hay una diferencia entre lo que algo *es* y cómo se *comporta*?)
69. Un electrón y un protón viajan con la misma rapidez. ¿Cuál tiene mayor cantidad de movimiento? ¿Cuál tiene la longitud de onda más larga?
70. Un electrón viaja el doble de rápido que otro. ¿Cuál tiene la longitud de onda más larga?
71. Analiza si la longitud de onda de De Broglie de un protón se alarga o se acorta con la velocidad.
72. No percibes la longitud de onda de la materia en movimiento en tu experiencia cotidiana. ¿Esto se debe a que la longitud de onda es extraordinariamente grande o extremadamente pequeña?
73. Imagina que vives en un mundo hipotético en el cual eres derribado por un solo fotón, en el que la materia es tan ondulatoria que es borrosa y difícil de asir, y en el que el principio de incertidumbre afecta mediciones simples de la posición y la rapidez en un laboratorio, por lo que los resultados son irreproducibles. En un mundo así, analiza cómo se compara la constante de Planck con el valor aceptado.
74. Discute la idea de que la teoría que uno acepta determina el significado de las observaciones propias y no al contrario.
75. Un amigo dice: "si un electrón no es una partícula, entonces debe ser una onda". ¿Cuál es tu respuesta? (¿Escuchas con frecuencia este tipo de enunciados "Si… entonces"?)

# PARTE SEIS Examen de práctica de opción múltiple

*Elige la MEJOR respuesta a cada una de las siguientes:*

1. ¿Cuál de éstas NO pertenece a la familia de las ondas electromagnéticas?
   (a) Luz (c) Ondas de radio
   (b) Sonido (d) Rayos X
2. La luz que no transmiten los materiales opacos
   (a) se refleja o convierte en energía interna en el material.
   (b) principalmente se refleja.
   (c) principalmente se refracta.
   (d) se transmite con una frecuencia más baja.
3. Cuando la sombra de la Luna cae sobre la Tierra, se tiene un
   (a) eclipse lunar.
   (b) eclipse solar.
   (c) eclipse solar si es de día y eclipse lunar si es de noche.
   (d) evento muy peligroso.
4. Negro es la combinación de
   (a) todos los colores.
   (b) dos o más colores adecuados.
   (c) luz cuando un prisma se sostiene de cabeza.
   (d) Ninguno de los anteriores.
5. Decir que el pétalo de una rosa es rojo es decir que
   (a) absorbe el rojo. (c) emite el rojo.
   (b) refleja el rojo. (d) transmite el rojo.
6. El color de la luz más intenso en la curva de radiación solar es
   (a) infrarrojo. (c) amarillo-verde.
   (b) rojo. (d) violeta.
7. Cuando las luces roja y azul se traslapan, el color producido es
   (a) magenta. (c) cian.
   (b) amarillo. (d) blanco.
8. El color complementario del azul es
   (a) magenta. (c) cian.
   (b) amarillo. (d) blanco.
9. Lo azul del cielo diurno se debe principalmente a la _____ de la luz.
   (a) absorción. (c) reflexión.
   (b) transmisión. (d) dispersión.
10. Lo rojizo de un atardecer o amanecer se debe principalmente a luz que no se ha
    (a) absorbido. (c) dispersado.
    (b) transmitido. (d) polarizado.
11. El color verdoso-azul del océano se debe principalmente a luz que no se ha
    (a) absorbido. (c) dispersado.
    (b) reflejado. (d) refractado.
12. La distancia de tu imagen detrás de un espejo plano es igual a
    (a) la mitad de tu estatura.
    (b) la mitad de tu distancia respecto del espejo.
    (c) tu distancia enfrente del espejo.
    (d) más que tu distancia enfrente del espejo.
13. La refracción ocurre cuando una onda cruza una frontera y cambia de
    (a) rapidez y dirección. (c) frecuencia.
    (b) intensidad. (d) amplitud.
14. Cuando la luz blanca pasa a través de un prisma, la luz que se dobla más que el verde es
    (a) roja. (c) azul.
    (b) amarilla. (d) Ninguno de los anteriores.
15. Un arcoíris es el resultado de la luz en las gotas de agua que experimenta
    (a) reflexión interna. (c) refracción.
    (b) dispersión. (d) Todos los anteriores.
16. Cuando un buzo apunta una linterna hacia arriba, hacia la superficie del agua, en un ángulo de 20° desde la normal, el haz de luz
    (a) se refleja totalmente de manera interna.
    (b) pasa hacia el aire de arriba.
    (c) se absorbe.
    (d) Ninguno de los anteriores.
17. Una imagen real puede proyectarse sobre una pantalla mediante
    (a) una lente convergente. (c) Cualquiera de las anteriores.
    (b) una lente divergente. (d) Ninguna de las anteriores.
18. El principio de Huygens para la luz se describe principalmente por
    (a) ondas. (c) partículas.
    (b) rayos. (d) fotones.
19. Una rejilla de difracción se apoya en
    (a) la interferencia de luz.
    (b) las amplitudes de la luz.
    (c) las variaciones en la intensidad de la luz.
    (d) la luz compuesta de fotones.
20. Cuando la luz experimenta interferencia, a veces puede
    (a) acumularse hasta más que la suma de las amplitudes.
    (b) cancelarse por completo.
    (c) Las dos anteriores.
    (d) Ninguna de las anteriores.
21. Los colores de una pompa de jabón resultan de
    (a) la luz convertida a una frecuencia diferente.
    (b) la deflexión de la luz.
    (c) la interferencia de la luz.
    (d) la polarización de la luz.
22. La polarización es una propiedad de
    (a) las ondas transversales. (c) todas las ondas.
    (b) las ondas longitudinales. (d) Ninguna de las anteriores.
23. Un holograma ilustra mejor la
    (a) polarización. (c) superposición.
    (b) difracción. (d) interferencia de electrones.
24. En la proporción $E \sim f$, la $f$ representa la
    (a) frecuencia de la luz.
    (b) frecuencia del sonido.
    (c) frecuencia de un diapasón o cuerda vibratoria.
    (d) fuerza de fricción.
25. La energía de un fotón emitido se relaciona con su
    (a) amplitud. (c) cantidad de movimiento.
    (b) polarización. (d) frecuencia.
26. Entre estos colores, el que tiene más energía por fotón es
    (a) el rojo. (c) el azul.
    (b) el amarillo-verde. (d) el violeta.
27. El brillo rojo del tubo de neón de un anuncio publicitario es resultado de
    (a) fluorescencia. (c) desexcitación.
    (b) incandescencia. (d) polarización.
28. Todas las partes de un haz láser tienen la misma
    (a) frecuencia. (c) rapidez.
    (b) fase. (d) Todas las anteriores.
29. El modelo de luz más apoyado por el efecto fotoeléctrico es
    (a) el modelo ondulatorio. (c) Los dos anteriores.
    (b) el modelo corpuscular. (d) Ninguno de los anteriores.
30. Para encontrar la constante de Planck se divide la energía de un fotón entre su
    (a) longitud de onda. (c) amplitud.
    (b) frecuencia. (d) Ninguna de las anteriores.

*Después* de hacer elecciones razonadas y discutirlas con tus amigos, encuentra las respuestas en la página S-1.

PARTE SIETE

# Físicas atómica y nuclear

¿Cuál es la fuente de energía que impulsa a este géiser? Es la misma fuente que calienta los manantiales termales, alimenta los volcanes y mantiene fundido el interior de la Tierra: ¡procesos radiactivos en las entrañas de la Tierra que son tan viejos como el mismo planeta Tierra!

32

CAPÍTULO 32

# El átomo y el cuanto


32.1 Descubrimiento del núcleo atómico

32.2 Descubrimiento del electrón

32.3 Espectros atómicos: pistas para la estructura atómica

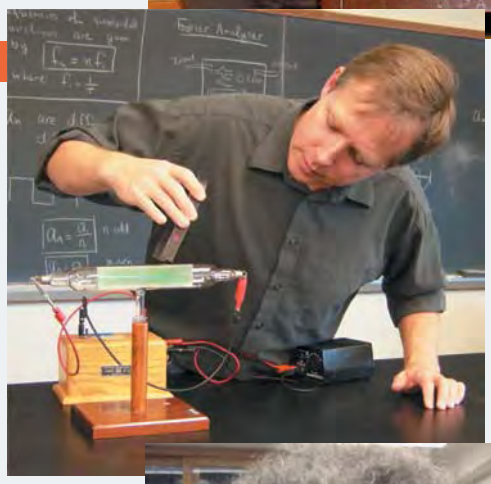
32.4 Modelo de Bohr del átomo

32.5 Explicación de los niveles de energía cuantizados: ondas de electrones

32.6 Mecánica cuántica

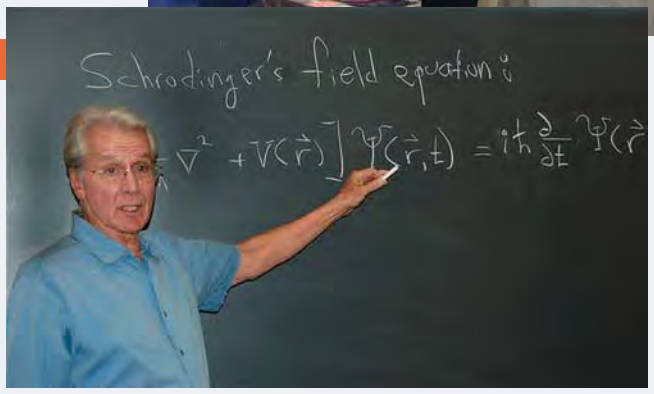
32.7 Principio de correspondencia

1



2

3




4

Estos cuatro físicos, que sobresalen en su enseñanza, aterrizan la física cuántica para sus estudiantes. 1 David Kagan usa una tira de papel corrugado en clase para modelar un electrón en órbita. Los bloques de madera apilados modelan los niveles de energía de los electrones. 2 Roger King usa un imán para doblar un haz de electrones en un tubo de Crookes. 3 Dean Zollman investiga las propiedades nucleares con una versión moderna del experimento de dispersión de Rutherford. 4 El profesor y autor Art Hobson enseña una de sus especialidades: la física cuántica.

Niels Bohr nació en Copenhague, Dinamarca, en 1885. Su padre, luterano, era profesor de fisiología en la Universidad de Copenhague. Su madre provenía de una acaudalada familia judía prominente en la banca y los círculos parlamentarios daneses. Su hermano, Harald Bohr, fue matemático y jugador olímpico de soccer en el equipo nacional danés. A Niels también le apasionaba el soccer, y los dos hermanos jugaron en varios partidos nacionales en Copenhague.

Niels Bohr

Bohr obtuvo su doctorado en física en Dinamarca en 1911. Luego trabajó durante un tiempo en el laboratorio de J. J. Thomson, el descubridor del electrón, en Trinity College, en Cambridge, Inglaterra, antes de continuar su investigación bajo la dirección de Ernest Rutherford en la University of Manchester, también en Inglaterra. Rutherford recién había descubierto que un pequeño núcleo con carga positiva se asienta en el centro de todo átomo, rodeado, presumiblemente, por los electrones de Thomson. Bohr reflexionó sobre este nuevo cuadro del átomo y le agregó principios cuánticos. Publicó su modelo de la estructura atómica en 1913, en el que los electrones viajan sólo en ciertas órbitas alrededor del núcleo atómico, y el átomo emite luz cuando los electrones realizan "saltos cuánticos" de una órbita a otra. Su teoría explicaba de un modo brillante las líneas espectrales observadas del hidrógeno y las llamadas series de Balmer, así como otras series.

Bohr ganó el Premio Nobel de Física en 1922 por su trabajo en la teoría cuántica de los átomos, un año después de que Albert Einstein ganara el Premio Nobel por su trabajo acerca del efecto fotoeléctrico. Después de que la teoría cuántica evolucionó y maduró a mediados de la década de 1920, Einstein tuvo grandes reservas respecto de su naturaleza probabilística, pues prefería el determinismo de la física clásica. Él y Bohr debatieron estas dos visiones de la física a lo largo de sus vidas, siempre manteniendo el mayor respeto uno por el otro.

Puesto que la madre de Bohr era judía, él estaba en peligro en la Dinamarca ocupada por los nazis durante la Segunda Guerra Mundial. En 1943, poco antes de un arresto inminente, escapó a Suecia con su familia. Los aliados, al reconocer la importancia de Bohr, lo llevaron de Suecia a Londres en el compartimiento de bombas de un bombardero Mosquito desarmado. Bohr olvidó ponerse su máscara de oxígeno y se desmayó. Por fortuna, el piloto, al percatarse de que algo andaba mal cuando Bohr no respondía los mensajes del intercomunicador, descendió a menor altitud y entregó en Londres a un pasajero todavía vivo. Al parecer Bohr dijo que había dormido como un bebé durante el vuelo. Después fue a Estados Unidos a trabajar en el Proyecto Manhattan estadounidense en el laboratorio ultrasecreto de Los Álamos, en Nuevo México. Por razones de seguridad se le asignó el nombre de Nicholas Baker durante el proyecto.

Después de la guerra, Bohr regresó a Copenhague, donde promovió el uso pacífico de la energía nuclear y la posibilidad de compartir información nuclear. Cuando el gobierno danés le otorgó la Orden del Elefante, diseñó su propio escudo de armas, en el que figuraba un símbolo de yin y yang con la leyenda latina *contraria sunt complementa*: "los opuestos se complementan".

El hijo de Bohr, Aage, llegó a convertirse en un físico muy exitoso y, al igual que su padre, ganó el Premio Nobel de Física, el suyo en 1975. Niels Bohr murió en Copenhague en 1962. Gran parte de este capítulo está inspirado en su visión de la física subyacente de la naturaleza.

## 32.1 Descubrimiento del núcleo atómico

Media docena de años después de que Einstein anunciara el efecto fotoeléctrico, el físico británico, nacido en Nueva Zelanda, Ernest Rutherford, dirigía su ahora famoso experimento de la hoja de oro.[1] Este significativo experimento demostró que el átomo es, principalmente, espacio vacío, con la mayor parte de su masa concentrada en la región central: el **núcleo atómico**.

En el experimento de Rutherford, un haz de partículas con carga positiva (partículas alfa) provenientes de una fuente radiactiva, se dirigía a través de una lámina extremadamente delgada de oro. Puesto que las partículas alfa son miles de veces más masivas que los electrones, se esperaba que el chorro de partículas alfa no tuviera impedimento para atravesar un mar de electrones. De hecho esto fue lo que se observó,

Ernest Rutherford (1871-1937)

[1]¿Por qué "dirigía"? Para indicar que más investigadores, además de Rutherford, participaron en este experimento. La práctica generalizada de elevar a un solo científico a la posición de investigador solitario, lo que pocas veces es el caso, con mucha frecuencia desconoce la intervención de otros investigadores. Ahí está la esencia del dicho: "Hay dos cosas más importantes para las personas que el sexo y el dinero: el *reconocimiento y el aprecio*".

Tiempo después, Rutherford relató que descubrir que las partículas alfa rebotaban fue el acontecimiento más increíble de su vida, tan increíble como si la ojiva de un cañón de 15 pulgadas disparado contra un pedazo de papel tisú rebotara.

en su mayor parte. Casi todas las partículas alfa atravesaron la lámina de oro con poca o ninguna desviación y produjeron una mancha de luz cuando golpearon una pantalla fluorescente detrás de la lámina. Pero algunas partículas se desviaron de sus trayectorias en línea recta cuando salieron. Algunas partículas alfa se desviaron ampliamente, ¡y un pequeño número incluso se dispersó hacia atrás! Estas partículas alfa debieron golpear algo relativamente masivo, ¿pero qué? Rutherford razonó que las partículas que no se desviaron atravesaron espacio vacío en regiones de la lámina de oro, en tanto que el pequeño número de partículas desviadas fueron repelidas de regiones centrales extremadamente densas y con carga positiva. Cada átomo, concluyó, debe contener uno de estos centros, que él llamó *núcleo atómico*.

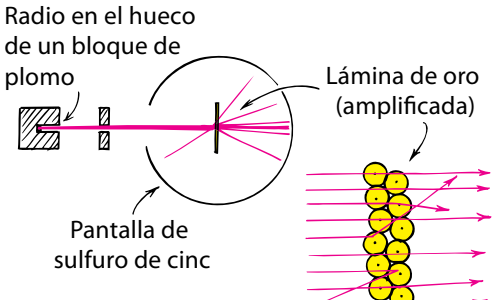



**FIGURA 32.1**
La dispersión ocasional a gran ángulo de las partículas alfa respecto de los átomos de oro condujo a Rutherford al descubrimiento de los núcleos pequeños y muy masivos en sus centros.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Qué convenció a Rutherford de que la lámina de oro era en su mayor parte espacio vacío?**
2. **¿Qué lo convenció de que las partículas de la hoja de oro eran masivas?**

Observarás que gran parte de este capítulo es una síntesis de capítulos ya estudiados: con suerte, es un capítulo de "recapitulación".

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Descubrir que la mayoría de las partículas alfa no se desviaba indicaba que había mucho espacio vacío.
2. Descubrir que algunas partículas alfa rebotaban indicaba la presencia de partículas más masivas que las partículas alfa.

## 32.2 Descubrimiento del electrón

Alrededor del núcleo atómico hay electrones. El nombre *electrón* proviene de la palabra griega para ámbar, una resina fósil amarilla parduzca estudiada por los antiguos griegos, quienes descubrieron que, cuando el ámbar se frotaba con un pedazo de tela, atraía cosas como fragmentos de paja. Este fenómeno, conocido como *efecto ámbar*, siguió siendo un misterio durante casi 2,000 años. A finales del siglo XVI, William Gilbert, médico de la reina Isabel, descubrió otros materiales que se comportaban como el ámbar y los llamó "eléctricos". El concepto de carga eléctrica aguardó los experimentos del científico-estadista estadounidense Benjamín Franklin durante casi dos siglos. Recuerda del Capítulo 22 que Franklin experimentó con electricidad y postuló la existencia de un fluido eléctrico que podía fluir de un lugar a otro. Al objeto con un exceso de este fluido lo denominó *eléctricamente positivo*, y al que tenía deficiencia del fluido lo denominó *eléctricamente negativo*. Se creía que el fluido atraía materia ordinaria, pero que se repelía a sí mismo. Aunque ya no se habla de un fluido eléctrico, todavía se sigue el ejemplo de Franklin en lo que se refiere a la manera de definir la electricidad positiva y negativa. El experimento de Franklin de 1752 con la cometa en la tormenta eléctrica demostró que los relámpagos son una descarga eléctrica entre las nubes y el suelo. Este descubrimiento le indicó que la electricidad no se restringe a objetos sólidos o líquidos y que puede atravesar un gas.

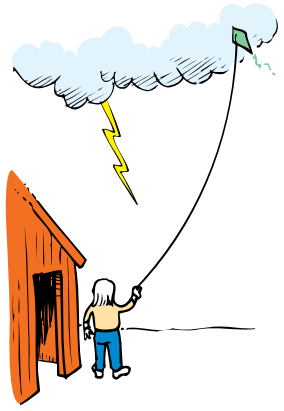


**FIGURA 32.2**
Experimento del vuelo de una cometa de Franklin.

Los experimentos de Franklin inspiraron después a otros científicos para producir corrientes eléctricas a través de varios gases diluidos en tubos de vidrio sellados. Entre ellos, en la década de 1870, estuvo sir William Crookes, un científico inglés nada ortodoxo que creía que podía comunicarse con los muertos. Es mejor recordado por su "tubo Crookes", un tubo de vidrio sellado que contiene gas sometido a muy baja presión y tiene electrodos en el interior del tubo en cada extremo (el predecesor de los actuales anuncios de neón). El gas brillaba cuando los electrodos se conectaban a una fuente de voltaje (como una batería). Diferentes gases brillaban con diferentes colores. Los experimentos realizados con tubos que contienen rendijas y placas metálicas demostraron que el gas se hacía brillar por algún tipo de "rayo" que salía de la terminal negativa (el *cátodo*). Las rendijas podían adelgazar el rayo y las placas podían evitar que el rayo llegara a la terminal positiva (el *ánodo*). Al aparato se le llamó *tubo de rayos catódicos*, o TRC (en inglés, CRT) (Figura 32.3). Cuando se acercaban al tubo cargas eléctricas, el rayo se desviaba. Se doblaba hacia las cargas positivas y se alejaba de las cargas negativas. El rayo también se desviaba por la presencia de un imán. Estos hallazgos indicaron que el rayo consistía en partículas con carga negativa.

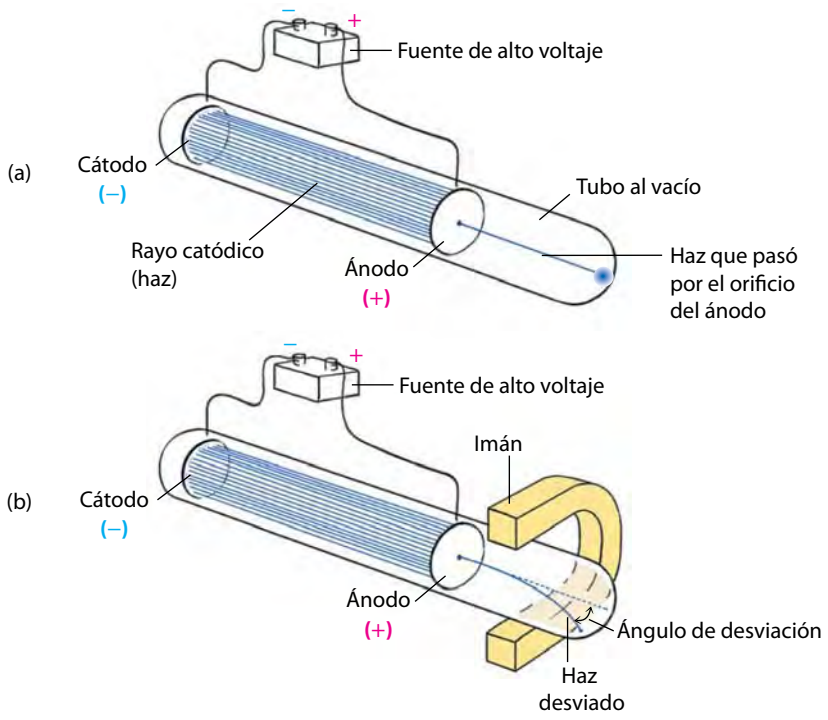



**FIGURA 32.3**
(a) Un tubo de rayos catódicos simple. El pequeño orificio en el ánodo permite el paso de un estrecho haz que golpea el extremo del tubo, lo que produce un punto brillante sobre el vidrio.
(b) El rayo catódico es desviado por un campo magnético.

En el año 1897, el físico inglés Joseph John Thomson ("J. J.", como lo llamaban sus amigos) demostró que los rayos catódicos eran partículas más pequeñas y más ligeras que los átomos. Creó haces estrechos de rayos catódicos y midió su desviación en campos eléctricos y magnéticos. Thomson pensó que la cantidad de desviación de los haces dependía de la masas de las partículas y de su carga eléctrica. ¿De qué manera? Cuanto mayor sea la masa de cada partícula, mayor será la inercia y menor la desviación. Cuanto mayor sea la carga de cada una de las partículas, mayor será la fuerza y mayor la desviación. Cuanto mayor sea la rapidez, menor será la desviación.

Con mediciones cuidadosas de la desviación del haz, Thomson logró calcular la razón entre masa y carga de la partícula del rayo catódico, a la que llamó **electrón**. Todos los electrones son idénticos; son copias unos de otros. Por establecer la existencia del electrón, J. J. Thomson obtuvo el Premio Nobel de Física en 1906.

En 1909, una docena de años después de que Thomson hizo sus mediciones de la relación entre masa y carga, el físico estadounidense Robert Millikan realizó un experimento que le permitió calcular el valor numérico de una sola unidad de carga eléctrica. En su experimento, Millikan roció pequeñas gotas de aceite en una cámara

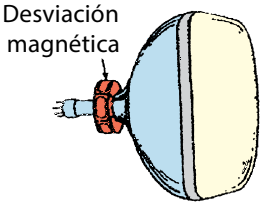



**FIGURA 32.4**
Los TRC como éste eran comunes antes de que las pantallas planas de televisión los reemplazaran.

entre placas con carga eléctrica: en un *campo eléctrico*. Cuando el campo era intenso, algunas de las gotas se movían hacia arriba, lo que indicaba que portaban una carga negativa muy ligera. Millikan ajustó el campo de modo que las gotas flotaran sin movimiento. Sabía que la fuerza descendente de la gravedad sobre las gotas se equilibraba exactamente con la fuerza eléctrica ascendente. La investigación demostró que la carga sobre cada gota siempre era algún múltiplo de un solo valor muy pequeño, que él propuso como la unidad fundamental de carga que portaba cada electrón. Con este valor y la razón entre masa y carga descubierta por Thomson, Millikan calculó la masa de un electrón en aproximadamente 1/2,000 la masa del átomo más ligero conocido, el hidrógeno. Esto confirmó la idea de Thomson de que el electrón era ligero y estableció la unidad cuántica de carga. Por su trabajo en física, Millikan recibió el Premio Nobel en 1923.

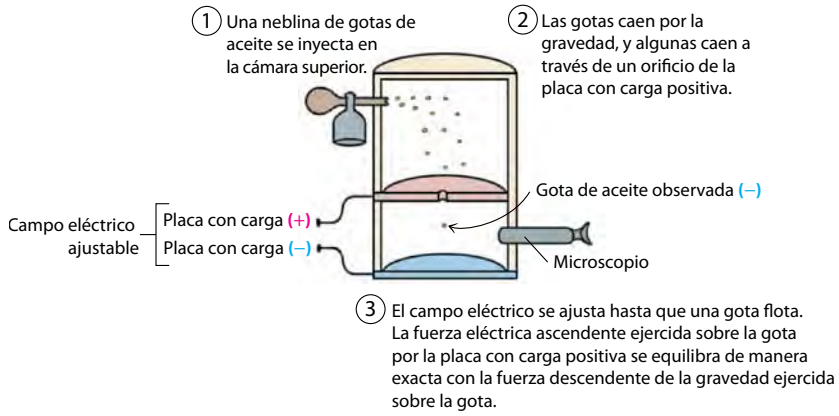



**FIGURA 32.5**
Experimento de la gota de aceite de Millikan para determinar la carga del electrón.

El electrón fue la primera de muchas partículas fundamentales que se descubrieron.

Si los átomos contienen electrones con carga negativa, es razonable pensar que los átomos también deben contener alguna materia con carga positiva que los equilibre. J. J. Thomson propuso lo que llamó modelo del "pudín de pasas" del átomo, en el que los electrones son como pasas en un mar de pudín con carga positiva. La experimentación de Rutherford y el experimento de la lámina de oro, mencionado antes, demostraron que este modelo era erróneo.

## 32.3 Espectros atómicos: pistas para la estructura atómica

Durante el periodo de los experimentos de Rutherford, los químicos usaban el espectroscopio (estudiado en el Capítulo 30) para el análisis químico, en tanto que los físicos estaban muy ocupados tratando de encontrar orden en los confusos arreglos de las líneas espectrales. Desde hacía mucho se sabía que el elemento más ligero, el hidrógeno, tenía un espectro mucho más ordenado que los demás elementos (Figura 32.6). Una importante secuencia de líneas del espectro del hidrógeno comienza con una línea en la región roja, seguida de una en la azul, luego varias líneas en el violeta, y muchas en el ultravioleta. El espaciamiento entre líneas sucesivas se vuelve cada vez más pequeño de la primera en el rojo a la última en el ultravioleta, hasta que las líneas se juntan tanto que parecen fundirse. Un profesor suizo, Johann Jakob Balmer, fue el primero en expresar las longitudes de onda de estas líneas en una sola fórmula matemática en 1884. Sin embargo, Balmer no pudo ofrecer una razón por la que su fórmula funcionaba tan bien. Su idea de que su fórmula podía extenderse y predecir otras líneas de hidrógeno resultó ser correcta, lo que condujo a la predicción de líneas que todavía no se habían medido.

**FIGURA 32.6**
Una porción del espectro del hidrógeno. Cada línea, una imagen de la rendija en el espectroscopio, representa luz de una frecuencia específica emitida por el gas hidrógeno cuando se excita (a la derecha está la frecuencia más alta).

Otra regularidad de los espectros atómicos la descubrió el físico y matemático sueco Johannes Rydberg. Él observó que las frecuencias de las líneas en determinadas series de otros elementos seguían una fórmula similar a la de Balmer, y que la suma de las frecuencias de dos líneas en dicha serie solía ser igual a la frecuencia de una tercera línea. Más adelante, el físico suizo Walter Ritz desarrolló esta relación y la convirtió en el principio general conocido como **principio de combinación de Ritz**. Dicho principio afirma que las líneas espectrales de cualquier elemento incluyen frecuencias que son o la suma o la diferencia de las frecuencias de otras dos líneas. Al igual que Balmer, Ritz no pudo ofrecer una explicación de esta regularidad. Sin embargo, estas regularidades fueron los indicios que utilizó el físico danés Niels Bohr para entender la estructura del átomo.

## 32.4 Modelo de Bohr del átomo

En 1913, Bohr aplicó la teoría cuántica de Planck y Einstein al átomo nuclear de Rutherford y formuló el bien conocido modelo planetario del átomo.[2] Bohr razonó que los electrones ocupaban estados "estacionarios" (de energía fija, no de posición fija) a diferentes distancias del núcleo y que los electrones podían hacer "saltos cuánticos" de un estado de energía a otro. Pensó que se emite luz cuando ocurre dicho salto cuántico (de un estado de mayor energía a uno de menor energía). Además, Bohr se dio cuenta de que la frecuencia de la radiación emitida está determinada por $E = hf$ (en realidad, $f = E/h$), donde $E$ es la diferencia en la energía del átomo cuando el electrón está en las diferentes órbitas. Éste fue un logro importante porque Bohr dijo que la frecuencia de los fotones emitidos no es la frecuencia clásica a la que un electrón vibra sino que, más bien, está determinada por las *diferencias* de energía en el átomo (como se estudió en el Capítulo 30). A partir de aquí, Bohr pudo dar el siguiente paso y determinar las energías de cada una de las órbitas.

El modelo planetario del átomo de Bohr planteaba una gran pregunta. Los electrones acelerados, de acuerdo con la teoría de Maxwell, irradian energía en forma de ondas electromagnéticas. De modo que un electrón que acelera alrededor de un núcleo debe irradiar energía en forma continua. Esta irradiación de energía debe hacer que el electrón caiga en espiral hacia el núcleo (Figura 32.8). Bohr se apartó osadamente de la física clásica y afirmó que el electrón no irradia luz mientras acelera alrededor del núcleo en una sola órbita, sino que la irradiación de luz ocurre sólo cuando el electrón realiza una transición de un nivel de energía más alto a uno más bajo. Como se sabe ahora, el átomo emite un fotón cuya energía es igual a la *diferencia* en energía entre los dos niveles de energía, $E = hf$. Como aprendiste en el Capítulo 30, la frecuencia del fotón emitido, su color, depende del tamaño del salto. De modo que la cuantización de la energía luminosa corresponde perfectamente con la cuantización de la energía del electrón.

Las ideas de Bohr, por extravagantes que parecieran en la época, explicaban las regularidades descubiertas en los espectros atómicos. En la Figura 32.9 se muestra la explicación de Bohr del principio de combinación de Ritz. Si un electrón se eleva hasta el tercer nivel de energía, puede regresar a su nivel inicial con un solo salto del tercero al primer nivel o con un salto doble, primero al segundo nivel y luego al primer nivel. Estas dos trayectorias de regreso producirán tres líneas espectrales. Observa que la suma de los dos saltos energéticos a lo largo de las trayectorias A y B es igual al salto energético individual a lo largo de la trayectoria C. Debido a que la frecuencia es proporcional a la energía, las frecuencias de la luz emitida a lo largo de las trayectorias A y B, cuando se suman, son iguales a la frecuencia de la luz emitida cuando la transición es a lo largo de la trayectoria C. Ahora puedes ver por qué la suma de dos frecuencias en el espectro es igual a una tercera frecuencia en el espectro.

[2]Este modelo, como casi todos los modelos, tiene grandes defectos porque los electrones no dan vueltas en planos como lo hacen los planetas. El modelo se revisó; las "órbitas" se convirtieron en "capas" y "nubes". El término *órbita* se utiliza porque fue, y sigue siendo, de uso común. Los electrones no son sólo cuerpos, como los planetas, sino más bien se comportan como ondas concentradas en determinadas partes del átomo.

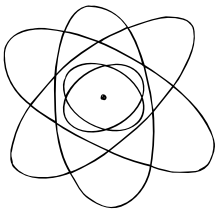


**FIGURA 32.7**
El modelo de Bohr del átomo. Aunque este modelo está muy simplificado, todavía es útil para comprender la emisión de luz.

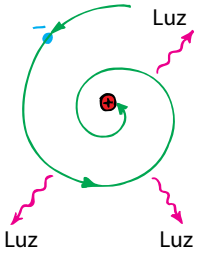



**FIGURA 32.8**
De acuerdo con la teoría clásica, un electrón que acelera alrededor de su órbita debe emitir radiación de manera continua. Esta pérdida de energía debe hacer que caiga rápidamente en espiral hacia el núcleo. Pero esto no ocurre.

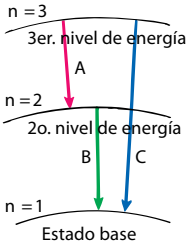



**FIGURA 32.9**
Tres de los muchos niveles de energía de un átomo. Un electrón que salta del tercer nivel al segundo nivel (rojo A), y uno que salta del segundo nivel al estado base (verde B). La suma de las energías (y las frecuencias) de estos dos saltos es igual a la energía (y la frecuencia) del salto sencillo del tercer nivel al estado base (azul C).

Bohr pudo explicar los rayos X en elementos más pesados, y mostró que se emiten cuando los electrones saltan de las órbitas más externas a las más internas. Predijo las frecuencias de los rayos X que luego se confirmaron con experimentos. Bohr también pudo calcular la "energía de ionización" de un átomo de hidrógeno: la energía necesaria para desprender por completo el electrón del átomo. Esto también fue verificado mediante experimentos.

Con las frecuencias medidas de los rayos X, así como de la luz visible, la infrarroja y la ultravioleta, los científicos pudieron mapear los niveles de energía de todos los elementos atómicos. El modelo de Bohr tenía electrones que orbitaban en círculos (o elipses) perfectos organizados en grupos o en capas. Este modelo del átomo explicaba las propiedades químicas generales de los elementos. También condujo al descubrimiento del hafnio.

Bohr resolvió el misterio de los espectros atómicos al tiempo que proporcionaba un modelo extremadamente útil del átomo. Fue rápido para subrayar que su modelo debía interpretarse como un mero comienzo, y la imagen de los electrones dando vueltas alrededor del núcleo como planetas alrededor del Sol no debía tomarse literalmente (hecho al que los divulgadores de la ciencia no pusieron atención). Sus órbitas muy bien definidas eran representaciones conceptuales de un átomo cuya descripción posterior incluía ondas: mecánica cuántica. Sus ideas de los saltos cuánticos y frecuencias proporcionales a las diferencias de energía siguen siendo parte de la teoría moderna de hoy.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Cuál es el número máximo de trayectorias de desexcitación disponibles para un átomo de hidrógeno excitado al nivel 3 y que cambia al estado base?**
2. **Dos líneas espectrales predominantes en el espectro de hidrógeno, una infrarroja y una roja, tienen frecuencias de $2.7 \times 10^{14}$ Hz y $4.6 \times 10^{14}$ Hz, respectivamente. ¿Puedes predecir una línea con frecuencia más alta en el espectro del hidrógeno?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Dos (un solo salto y un salto doble), como se muestra en la Figura 32.9.
2. La suma de las frecuencias es $2.7 \times 10^{14} + 4.6 \times 10^{14} = 7.3 \times 10^{14}$ Hz, que resulta ser la frecuencia de una línea violeta en el espectro del hidrógeno. Con la Figura 32.9 como modelo, ¿puedes ver que si la línea infrarroja se produce por una transición similar a la trayectoria A y la línea roja corresponde a la trayectoria B, entonces la línea violeta corresponde a la trayectoria C?

## 32.5 Explicación de los niveles de energía cuantizados: ondas de electrones

VIDEO: Ondas de electrones

En el Capítulo 11 se estudiaron los diferentes tamaños de los átomos; esto se mostró en la Figura 11.10. En el Capítulo 30 se analizaron la excitación atómica y cómo los átomos emiten fotones cuando sus electrones hacen transiciones entre niveles de energía. La idea de que los electrones pueden ocupar ciertos niveles de energía fue muy sorprendente para los primeros investigadores y para el mismo Bohr. Fue sorprendente porque el electrón al principio se consideró como análogo a una partícula, una pequeña munición, que daba vueltas al núcleo como un planeta da vueltas alrededor del Sol. Así como un satélite puede orbitar a cualquier distancia del Sol, parecería que un electrón podría orbitar alrededor del núcleo a cualquier distancia radial, dependiendo, desde luego, como en el satélite, de su rapidez. Moverse entre todas las órbitas permitía a los electrones emitir todas las energías de luz. Pero esto no sucede (recuerda la Figura 32.8). Para entender por qué el electrón ocupa sólo niveles discretos hay que considerar al electrón no como una partícula, sino como una *onda*.

Louis de Broglie introdujo el concepto de ondas de materia en 1924. Planteó la hipótesis de que una onda se asocia a cada partícula y que la longitud de onda de una onda de materia se relaciona de forma inversa a la cantidad de movimiento de la partícula. Estas *ondas de materia* se comportan igual que otras ondas; pueden reflejarse, refractarse, difractarse y hacer que interfieran. Con la idea de la interferencia, De Broglie demostró que los valores discretos de los radios de las órbitas de Bohr son una consecuencia natural de las ondas electrónicas estacionarias. Una órbita de Bohr existe donde una onda electrónica se cierra sobre sí misma de manera constructiva. La onda electrónica actúa como una onda estacionaria, como una onda sobre una cuerda musical. De acuerdo con esta visión, el electrón se considera no como una partícula ubicada en algún punto en el átomo, sino como si su masa y carga estuvieran dispersas en una onda estacionaria que rodea al núcleo atómico, con un número entero de longitudes de onda que encajan en forma equitativa en las circunferencias de las órbitas (Figura 32.10). La circunferencia de la órbita más interna, de acuerdo con esta imagen, es igual a una longitud de onda. La segunda órbita tiene una circunferencia de dos longitudes de onda de electrón, la tercera tiene tres, y así sucesivamente (Figura 32.11). Esto es similar a un collar de clips. Sin importar de qué tamaño se haga el collar, su circunferencia es igual a algún múltiplo de la longitud de un solo clip.[3] Dado que las circunferencias de las órbitas electrónicas son discretas, entonces los radios de dichas órbitas y, por tanto, los niveles de energía, también son discretos.

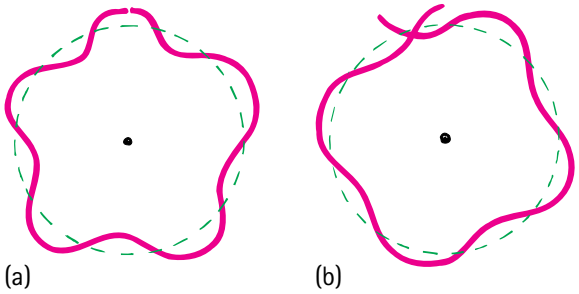



**FIGURA 32.10**
(a) Un electrón que orbita forma una onda estacionaria sólo cuando la circunferencia de su órbita es igual a un múltiplo entero de la longitud de onda. (b) Cuando la onda no se cierra sobre sí misma en fase, experimenta una interferencia destructiva. Por tanto, las órbitas sólo existen donde las ondas se cierran sobre ellas mismas en fase.

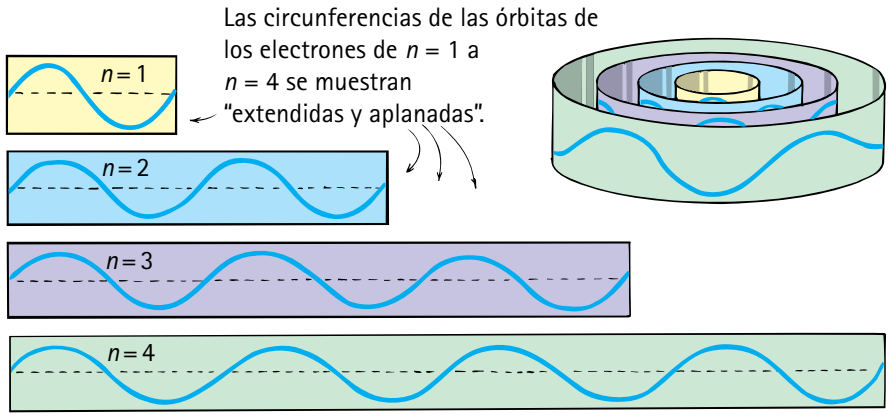



**FIGURA 32.11**
Las órbitas de los electrones en un átomo tienen radios discretos porque las circunferencias de las órbitas son múltiplos enteros de la longitud de onda del electrón. Esto resulta en un estado de energía discreto para cada órbita. (La figura está muy simplificada porque las ondas estacionarias constituyen capas esféricas y elipsoidales y no planas y circulares.)

Este modelo explica por qué los electrones no caen en espiral hacia el núcleo, lo que haría que los átomos se encogieran al tamaño del pequeño núcleo. Si cada órbita electrónica se describe mediante una onda estacionaria, entonces las circunferencias de la órbita más pequeña puede no ser más pequeña que una longitud de onda: en una onda estacionaria circular (o elíptica) no es posible una fracción de una longitud de onda. En tanto el electrón porte la cantidad de movimiento necesaria para el comportamiento ondulatorio, los átomos no se encogen sobre ellos mismos.

En el todavía más moderno modelo ondulatorio del átomo, las ondas de electrones se mueven no sólo alrededor del núcleo, sino también hacia adentro y hacia afuera, acercándose y alejándose del núcleo. La onda electrónica se dispersa en tres dimensiones, lo que conduce a la imagen de una "nube" de electrones. Como verás, esta es una nube de *probabilidad*, no una nube constituida de electrones pulverizados dispersos en el espacio. El electrón, cuando se detecta, sigue siendo una partícula puntual.

**SCREENCAST: Ondas de materia**

[3]Para cada órbita, el electrón tiene una rapidez única, que determina su longitud de onda. Las rapideces de los electrones son menores, y las longitudes de onda son más grandes, a medida que los radios de las órbitas crecen, de modo que, para que la analogía sea exacta, se tiene que usar no sólo más clips para hacer collares cada vez más largos, sino también clips cada vez más grandes.

Erwin Schrödinger (1887-1961)

## 32.6 Mecánica cuántica

A mediados de la década de 1920 ocurrieron muchos cambios en la física. No sólo se estableció experimentalmente la naturaleza corpuscular de la luz, sino también se descubrió que las partículas de materia tenían propiedades ondulatorias. A partir de las ondas de materia de De Broglie, el físico austriaco Erwin Schrödinger formuló una ecuación que describe cómo cambian las ondas de materia bajo la influencia de fuerzas externas. La ecuación de Schrödinger tiene la misma importancia en la **mecánica cuántica** que la que tiene la ecuación de Newton (aceleración = fuerza/masa) en la física clásica.[4] Las ondas de materia en la ecuación de Schrödinger son entidades matemáticas que no son directamente observables, de modo que la ecuación proporciona un modelo meramente matemático, y no uno visual, del átomo, lo que la coloca fuera del ámbito de este libro. Así que esta discusión será breve.[5]

En la **ecuación de onda de Schrödinger**, la cosa que "ondula" es la inmaterial *amplitud de onda de materia*: una entidad matemática llamada *función de onda*, representada por el símbolo $\psi$ (la letra griega psi minúscula). La función de onda determinada por la ecuación de Schrödinger representa las posibilidades que pueden ocurrir en un sistema. Por ejemplo, el electrón en un átomo de hidrógeno puede estar en cualquier parte que va desde el centro del núcleo hasta una distancia radial lejana. La posición posible de un electrón y su posición probable en un momento particular no son lo mismo. Para calcular su posición probable, un físico multiplica la función de onda por sí misma ($|\psi|^2$). Esto produce una segunda entidad matemática llamada *función de densidad de probabilidad*, que, en un tiempo dado, indica la probabilidad por unidad de volumen para cada una de las posibilidades representadas por $\psi$.

Experimentalmente, hay una probabilidad finita (cuantificación de una posibilidad) de encontrar un electrón en una región particular en cualquier instante. El valor de esta probabilidad se encuentra entre los límites 0 y 1, donde 0 indica nunca y 1 indica siempre. Por ejemplo, si la probabilidad de encontrar el electrón dentro de cierto radio es 0.4, esto significa un 40% de probabilidad de que el electrón exista ahí. De modo que la ecuación de Schrödinger no le indica a un físico dónde puede encontrarse un electrón en un átomo en todo momento, sino sólo la *probabilidad* de encontrarlo ahí; o, en el caso de un número grande de mediciones, qué fracción de esas mediciones encontrará al electrón en cada región. Cuando la posición de un electrón en su nivel (estado) energético de Bohr se mide en repetidas ocasiones y cada una de sus posiciones se grafica como un punto, el patrón resultante parece una especie de nube de electrones (Figura 32.12). Cada electrón puede, en diferentes momentos, detectarse en alguna parte de esta nube de probabilidades; incluso tiene una probabilidad en extremo pequeña, pero finita, de existir momentáneamente en el interior del núcleo. Sin embargo, la mayor parte del tiempo se detecta a una distancia promedio del núcleo que coincide con el radio orbital descrito por Niels Bohr.

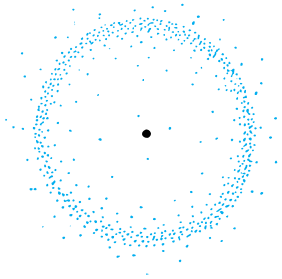


**FIGURA 32.12**
La distribución de probabilidades de una nube de electrones para un estado excitado particular.

La mayoría de los físicos, pero no todos, ven la mecánica cuántica como una teoría fundamental de la naturaleza. Es muy interesante que Albert Einstein, uno de los fundadores de la física cuántica, nunca la aceptara como fundamental; él consideraba la naturaleza probabilística de los fenómenos cuánticos como el resultado de una física más profunda, aunque todavía no descubierta. Afirmó: "Sin duda que la mecánica cuántica es impresionante. Pero una voz interior me dice que todavía no es lo verdadero. La teoría dice mucho, pero en realidad no nos acerca más al secreto del 'Viejo'".[6]

[4] La ecuación de onda de Schrödinger, estrictamente para matemáticos, es $\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + U\right]\Psi = i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t}$.

[5] El breve abordaje de este tema complejo difícilmente conduce a una comprensión auténtica de la mecánica cuántica. Cuando mucho, sirve como un breve vistazo y una posible introducción a más estudio. Por ejemplo, lee el libro de Ken Ford *The Quantum World: Quantum Physics for Everyone* (El mundo cuántico. Física cuántica para todos) (Harvard University Press, edición de bolsillo, 2005).

[6] Aunque Einstein no practicaba religión alguna, con frecuencia invocaba a Dios como el "Viejo" en sus declaraciones sobre los misterios de la naturaleza.

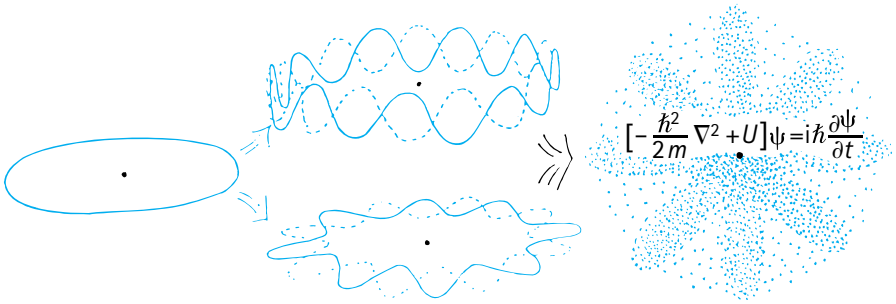



**FIGURA 32.13**
Del modelo del átomo de Bohr, al modelo modificado con ondas de De Broglie, al modelo ondulatorio con los electrones distribuidos en una "nube" por todo el volumen atómico.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Considera 100 fotones que se difractan a través de una delgada rendija para formar un patrón de difracción. Si detectas cinco fotones en cierta región en el patrón, ¿cuál es la probabilidad (entre 0 y 1) de detectar un fotón en esta región?**
2. **Supón que abres una segunda rendija idéntica y el patrón de difracción tiene bandas claras y oscuras. Supón que la región donde antes golpeaban cinco fotones ahora no contiene ninguno. Una teoría ondulatoria dice que las ondas que golpeaban antes ahora se cancelan por ondas provenientes de la otra rendija: que las crestas y los valles se combinan en cero. Pero la medición es de fotones que o golpean o no golpean. ¿Cómo resuelve esto la mecánica cuántica?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Se tiene aproximadamente una probabilidad de 0.05 de detectar un fotón en esta posición. La verdadera probabilidad podría ser un poco mayor o menor que 0.05. Dicho de otra forma, si la verdadera probabilidad es 0.05, entonces el número detectado podría ser un poco mayor o menor que 5.
2. La mecánica cuántica dice que los fotones se propagan como ondas y se absorben como partículas; la probabilidad de absorción es gobernada por los máximos y mínimos de interferencia ondulatoria. En el lugar donde la onda combinada de dos rendijas tiene una amplitud cero, la probabilidad de que una partícula sea absorbida es cero.

Considerar algo como imposible puede reflejar una falta de comprensión, como cuando los científicos pensaban que nunca podría verse un solo átomo. O puede representar una comprensión profunda, como cuando los científicos (¡y la oficina de patentes!) rechazan las máquinas de movimiento perpetuo.

## 32.7 Principio de correspondencia

El principio de correspondencia es una regla general no sólo para la buena ciencia, sino para toda buena teoría, incluso en áreas tan alejadas de la ciencia como el gobierno, la religión y la ética. Si una teoría nueva es válida, debe dar cuenta de los resultados verificados de la teoría antigua. Este es el **principio de correspondencia**, articulado por primera vez por Bohr. La teoría nueva y la teoría anterior deben corresponder; esto es: se deben traslapar y concordar en la región donde los resultados de la teoría anterior están completamente verificados.

Bohr introdujo el principio de correspondencia en relación con su teoría del átomo de hidrógeno de 1913. Razonó que, cuando un electrón está en un estado enormemente excitado y orbita lejos del núcleo atómico, su comportamiento debe parecerse (corresponder) al comportamiento clásico. Y de hecho cuando un electrón en dicho estado muy excitado hace una serie de saltos cuánticos, de un estado al siguiente más bajo y así en dirección descendente, entonces emite fotones de frecuencia cada vez mayor que coinciden con su propia frecuencia de movimiento. Parece caer en espiral hacia adentro, como lo predice la física clásica.

Cuando las técnicas de la mecánica cuántica se aplican a sistemas todavía más grandes, los resultados son en esencia idénticos a los de la mecánica clásica. Los dos dominios

## BOSÓN DE HIGGS

En el Capítulo 4 estudiaste la masa, una propiedad de la materia que se resiste a los cambios de movimiento. Si pateas un balón de soccer y una bola de boliche, es fácil sentir las diferentes resistencias al movimiento. La bola de boliche, con su mayor masa, tiene una mayor resistencia. ¿De dónde proviene esta resistencia? Ésta no era una pregunta que los físicos plantearan en la primera mitad del siglo XX. La masa sólo estaba *ahí*, una propiedad de casi todas las partículas y, por tanto, de los objetos más grandes construidos con dichas partículas. Pero en la década de 1960, los teóricos construyeron lo que parecía ser una teoría satisfactoria de todas las partículas fundamentales, pero tenía un serio defecto: predecía que todas las partículas, no sólo el fotón, carecían de masa. ¿Qué hacer? Rechazar la teoría era una posibilidad, pero los físicos estaban cautivados con la belleza matemática.

En 1964, el físico escocés Peter Higgs (a quien pronto se unieron otros con ideas similares) sugirió una salida. Un nuevo campo que llenara todo el espacio podría proporcionar una especie de "viscosidad" que imbuiría a las partículas con masa. Esto llegó a llamarse el "campo Higgs" y los físicos estuvieron inclinados a creer en él. Sin embargo, verificar su existencia era un problema monumental. Para encontrar un campo subatómico había que buscar la partícula que fuera una manifestación misma del campo. Todos los campos tienen partículas asociadas: el fotón del campo electromagnético, el gravitón del campo gravitacional, y así sucesivamente. Para verificar el campo Higgs, los físicos calcularon que debería haber una partícula muy masiva con carga cero y espín cero: un bosón. (Hay dos tipos de partículas fundamentales: bosones sin espín y fermiones, como el electrón, con espín.)

La búsqueda del "bosón de Higgs", como llegó a llamarse dicha partícula, duró varias décadas. Finalmente, el 4 de julio de 2012, los científicos del Gran Colisionador de Hadrones del laboratorio CERN de Ginebra, Suiza, anunciaron el descubrimiento de una partícula que tenía todas las propiedades esperadas y una masa 133 veces la del protón (que, a su vez, es casi 2,000 veces la masa de un electrón). Menos de un año después, el 14 de marzo de 2013, la evidencia experimental confirmó el bosón de Higgs.

La comunidad científica está eufórica porque el descubrimiento de esta partícula esquiva respalda el "modelo estándar" de partículas fundamentales y brinda la esperanza de que los físicos estén en camino de algún día comprender la gravedad de un modo más profundo y aprender más de la materia oscura y de la energía oscura (que se analizaron en forma breve en el Capítulo 9).

se mezclan cuando la longitud de onda de De Broglie es pequeña comparada con las dimensiones del sistema o de los pedazos de materia en el sistema. Es satisfactorio saber que la teoría cuántica y la teoría clásica, que hacen predicciones por completo diferentes al nivel de un solo átomo, se combinen sin dificultades en una descripción de la naturaleza que se extiende desde las cosas más pequeñas hasta las más grandes en el Universo.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Núcleo atómico.** El centro con carga positiva de un átomo, que contiene protones y neutrones y casi toda la masa del átomo, pero sólo una pequeña fracción de su volumen.

**Electrón.** La partícula negativa en la parte exterior de un átomo.

**Principio de recombinación de Ritz.** Enunciado que dice que las frecuencias de algunas líneas espectrales de los elementos son las sumas o las diferencias de las frecuencias de otras dos líneas.

**Mecánica cuántica.** Teoría del micromundo que está basada en funciones de onda y probabilidades, desarrollada en especial por Werner Heisenberger (1925) y Erwin Schrödinger (1926).

**Ecuación de onda de Schrödinger.** Ecuación fundamental de la mecánica cuántica que relaciona las amplitudes de la onda de probabilidad con las fuerzas que actúan sobre el sistema. Es tan básica para la mecánica cuántica como las leyes de movimiento de Newton lo son para la mecánica clásica.

**Principio de correspondencia.** Regla que establece que una teoría nueva debe producir los mismos resultados que la teoría vieja donde se sabe que es válida la teoría anterior.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 32.1 Descubrimiento del núcleo atómico

1. ¿Por qué la mayoría de las partículas alfa disparadas hacia una lámina de oro salen casi sin desviarse?
2. ¿Qué descubrió Rutherford sobre el núcleo atómico?

### 32.2 Descubrimiento del electrón

3. ¿Qué postuló Benjamín Franklin sobre la electricidad?
4. ¿Qué es un rayo catódico?
5. ¿Qué propiedad de un rayo catódico se hace evidente cuando un imán se acerca al tubo?
6. ¿Qué descubrimiento de J. J. Thomson le hizo ganar el Premio Nobel?
7. ¿Qué descubrió Robert Millikan acerca del electrón?

### 32.3 Espectros atómicos: pistas para la estructura atómica

8. ¿Qué descubrió Johann Jakob Balmer del espectro del hidrógeno?
9. ¿Qué descubrieron Johannes Rydberg y Walter Ritz de los espectros atómicos?

### 32.4 Modelo de Bohr del átomo

10. ¿Qué relación postuló Bohr entre las órbitas de los electrones y la emisión de luz?
11. De acuerdo con Niels Bohr, ¿es posible que un solo electrón en un estado excitado ceda más de un fotón cuando salta a un estado energético más bajo?
12. ¿Cuál es la relación entre las diferencias de energía de las órbitas en un átomo y la luz emitida por el átomo?

### 32.5 Explicación de los niveles de energía cuantizados: ondas de electrones

13. ¿De qué manera tratar al electrón como una onda y no como una partícula resuelve el acertijo de por qué las órbitas de los electrones son discretas?
14. De acuerdo con el modelo simple de De Broglie, ¿cuántas longitudes de onda existen en una onda electrónica en la primera órbita? ¿En la segunda órbita? ¿En la $n$-ésima órbita?
15. ¿Cómo puedes explicar por qué los electrones no caen en espiral hacia el núcleo que los atrae?

### 32.6 Mecánica cuántica

16. ¿Qué representa la función de onda $\psi$?
17. ¿Cómo es que la función de densidad de probabilidad difiere de la función de onda?
18. ¿Cómo es que la nube de probabilidades del electrón en un átomo de hidrógeno se relaciona con la órbita descrita por Niels Bohr?

### 32.7 Principio de correspondencia

19. ¿Qué es exactamente lo que se "corresponde" en el principio de correspondencia?
20. ¿La ecuación de Schrödinger sería válida si se aplicara al sistema solar? ¿Sería útil?

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

21. Considera los fotones emitidos de una lámpara ultravioleta y un transmisor de televisión. ¿Cuál tiene la mayor (a) longitud de onda, (b) energía, (c) frecuencia y (d) cantidad de movimiento?
22. ¿Qué color de luz es el resultado de una mayor transición energética: el rojo o el azul?
23. ¿De qué forma el experimento de dispersión de la lámina de oro de Rutherford demostró que el núcleo atómico es pequeño y muy masivo?
24. ¿Cómo es que el modelo del átomo de Rutherford explica la dispersión hacia atrás de las partículas alfa dirigidas a la lámina de oro?
25. En la época del experimento de la lámina de oro de Rutherford, los científicos sabían que en el interior del átomo había electrones con carga negativa, pero no sabían dónde residía la carga positiva. ¿Qué información acerca de la carga positiva proporcionó el experimento de Rutherford?
26. ¿Por qué a las líneas espectrales a menudo se les denomina "huellas digitales atómicas"?
27. Cuando un electrón hace una transición de su primer nivel cuántico al estado base, la diferencia de energía la porta el fotón emitido. En comparación, ¿cuánta energía se necesita para regresar un electrón en su estado base al primer nivel cuántico?
28. La Figura 32.9 muestra tres transiciones entre tres niveles de energía que producirían tres líneas espectrales en un espectroscopio. Si el espaciamiento energético entre los niveles fuese igual, ¿esto afectaría el número de líneas espectrales?
29. En términos de longitud de onda, ¿cuál es la órbita más pequeña que puede tener un electrón alrededor del núcleo atómico?
30. ¿Cuál explica mejor el efecto fotoeléctrico: la naturaleza corpuscular o la naturaleza ondulatoria del electrón? ¿Cuál explica mejor los niveles discretos en el modelo de Bohr del átomo? Defiende tus respuestas.
31. ¿Cómo es que el modelo ondulatorio de los electrones que orbitan el núcleo explica los valores de energía discretos en lugar de un intervalo continuo de valores de energía?
32. ¿Por qué el helio y el litio muestran comportamientos químicos muy diferentes, aun cuando sólo difieren por un electrón? ¿Por qué esta pregunta está en este capítulo y no en el Capítulo 11?
33. El principio de combinación de Ritz puede considerarse como un enunciado de la conservación de energía. Explica.
34. ¿El modelo de De Broglie afirma que un electrón debe moverse con la finalidad de tener propiedades ondulatorias? Defiende tu respuesta.
35. ¿Por qué una órbita electrónica estable que consista en una circunferencia de 2.5 longitudes de onda de De Broglie no existe en ningún átomo?
36. Una órbita es una trayectoria perceptible que sigue un objeto en su revolución alrededor de otro objeto. Un

orbital atómico es un esparcimiento electrónico sobre un *volumen de espacio* en el que es más probable que el electrón se encuentre. ¿Qué tienen en común las órbitas y los orbitales?

37. ¿Una partícula puede difractarse? ¿Puede presentar interferencia?
38. ¿Cuál es la relación entre la amplitud de una onda de materia y la probabilidad?
39. Si la constante de Planck, *h*, fuera más grande, ¿los átomos también serían más grandes? Defiende tu respuesta.
40. ¿Qué es lo que ondula en la ecuación de onda de Schrödinger?
41. Cuando sólo se observan algunos fotones, la física clásica falla. Cuando se observan muchos, la física clásica es válida. ¿Cuál de estos dos hechos es congruente con el principio de correspondencia?
42. ¿Cuándo y dónde se traslapan las leyes de movimiento de Newton y la mecánica cuántica?
43. ¿Qué dice el principio de correspondencia de Bohr sobre la mecánica cuántica y la mecánica clásica?
44. ¿El principio de correspondencia tiene aplicación para eventos macroscópicos en el macromundo cotidiano?
45. ¿Qué tiene que ver la naturaleza ondulatoria de la materia con el hecho de que uno no puede atravesar paredes sólidas, como suelen mostrar las películas de Hollywood usando efectos especiales?
46. La grandeza o la pequeñez sólo tienen significado en relación con algo más. ¿Por qué generalmente la rapidez de la luz se refiere como "grande" y la constante de Planck como "pequeña"?
47. Elabora una pregunta de opción múltiple que compruebe que un compañero de clase entendió la diferencia entre los ámbitos de la mecánica clásica y la mecánica cuántica.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

48. Si el electrón en un átomo de hidrógeno obedeciera la mecánica clásica en lugar de la mecánica cuántica, ¿emitiría un espectro continuo o un espectro de líneas? Explica.
49. ¿Cómo es que los elementos con números atómicos bajos pueden tener tantas líneas espectrales?
50. Si el mundo del átomo es tan incierto y sujeto a las leyes de la probabilidad, ¿cómo pueden medirse con exactitud cosas como la intensidad luminosa, la corriente eléctrica y la temperatura?
51. Cuando se dice que los electrones tienen propiedades de partícula y a continuación se dice que los electrones tienen propiedades ondulatorias, ¿no existe una contradicción? Explica.
52. ¿Por qué la física clásica predice que los átomos deben colapsarse?
53. ¿Einstein apoyaba la mecánica cuántica como física fundamental, o pensaba que la mecánica cuántica estaba incompleta?
54. Richard Feynman, en su libro *El carácter de las leyes físicas*, afirma: "Un filósofo dijo una vez, 'es necesario para la existencia misma de la ciencia que las mismas condiciones siempre produzcan los mismos resultados'. Bien, ¡no lo hacen!". ¿Quién hablaba de física clásica y quién hablaba de física cuántica?

33

CAPÍTULO 33

# El núcleo atómico y la radiactividad

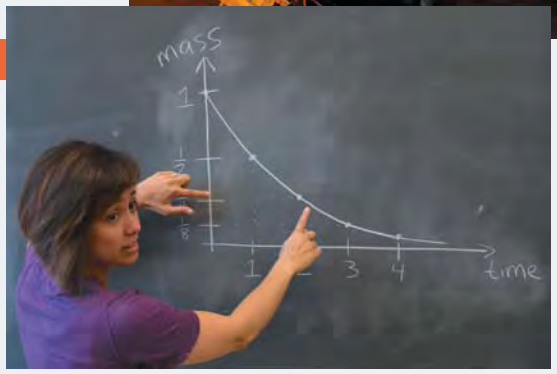

33.1 Los rayos X y la radiactividad
33.2 Rayos alfa, beta y gamma
33.3 Radiación ambiental
33.4 El núcleo atómico y la fuerza fuerte
33.5 Vida media radiactiva
33.6 Detectores de radiación
33.7 Transmutación de elementos
33.8 Datación radiométrica


1

2

3

4




**1** Stanley Micklavzina utiliza un contador Geiger para medir la radiactividad de un salero de cerámica Fiesta. En la década de 1930 se utilizaba uranio en el vidriado cerámico de las vajillas Fiesta para obtener el color rojizo. **2** El decaimiento radiactivo en el interior de la Tierra calienta el agua que alimenta los manantiales térmicos de todo el mundo. Estos manantiales impresionantes, cargados con carbonato de calcio, se encuentran en Pamukkale, Turquía. **3** El profesor de la University of Melbourne, Roger Rassool, utiliza un contador de centelleo para mostrar que las trayectorias de los rayos gamma no son afectadas por un campo magnético, como se ilustra en la Figura 33.3. **4** Leilah McCarthey explica la vida media radiactiva a sus alumnos del City College de San Francisco.

¿Qué físico ganó dos Premios Nobel, uno de física y otro de química, y tuvo una hija que también ganó un Premio Nobel de Química? La respuesta es Madame Curie. Nacida en 1867 con el nombre de Marie Sklodowska, en Varsovia, entonces parte del Imperio Ruso, recibió su educación general en escuelas de la localidad con un poco de instrucción científica impartida por su padre, un profesor de secundaria. Alentada por su hermana mayor, Bronislawa, quien era médico y se había mudado a París, Marie también se mudó allí para continuar sus estudios en la Sorbona. Ahí vivió en un desván rústico, que ella eligió porque era costeable y estaba cerca de la universidad. En 1894, después de obtener su primer grado, conoció al amor de su vida, el profesor de física Pierre Curie. En 1895 se casaron y pronto comenzaron a trabajar juntos.

**Marie Curie (1867-1934)**

En 1896, el físico francés Henri Becquerel descubrió que las sales de uranio emitían rayos parecidos a los rayos X por su capacidad de penetrar en la materia sólida. Marie y Pierre comenzaron a investigar el uranio. Fueron quienes acuñaron la palabra *radiactividad*, que se convirtió, para Marie, en el trabajo de su vida. Por aquella época (1898), con la ciudadanía francesa, Marie, en honor a su país natal, le puso el nombre de polonio al primer nuevo elemento químico que ella y Pierre descubrieron. También descubrieron y nombraron al elemento radio. En 1903, Pierre y Marie compartieron el Premio Nobel de Física con Henri Becquerel por su trabajo con la radiactividad. Algunas fuentes dicen que los Curie compartieron el dinero del premio con conocidos necesitados, incluidos algunos alumnos. La Sorbona de París rindió homenaje a Pierre con una cátedra y un laboratorio del que Marie fue directora.

En 1906, una carreta tirada por caballos golpeó a Pierre cuando cruzaba la calle bajo la lluvia. Pierre cayó bajo las ruedas y murió de una fractura de cráneo. Marie estaba devastada por la muerte de su esposo. El departamento de física de la Sorbona encomendó a Marie el puesto de Pierre. Ella fue la primera mujer profesora de la Sorbona, donde continuó su trabajo y obtuvo el Premio Nobel de Química en 1911. También fue nombrada Directora del Laboratorio Curie del Instituto de Radio de la Université de Paris, fundado en 1914.

Durante la Primera Guerra Mundial donó sus medallas de oro del Premio Nobel para las actividades de la guerra. En 1921 fue recibida triunfalmente en su primera visita a Estados Unidos, donde recaudó fondos para la investigación del radio. En 1929 recorrió de nuevo Estados Unidos, cuando el presidente Hoover le entregó un cheque por US$50,000, suficientes para comprar 1 gramo de radio para el Instituto de Radio de París.

Madame Curie visitó Polonia por última vez en 1934. Un par de meses después murió, es probable que por la exposición excesiva a la radiación que soportó durante su vida de trabajo. En aquella época no se comprendían por completo los efectos dañinos de la radiación ionizante. Fue enterrada en el cementerio de Sceaux, junto a su esposo Pierre. Sesenta años después, en 1995, en homenaje a sus logros, los restos de ambos se transfirieron al *Panthéon* de París. Ella fue la primera mujer en recibir tal honor.

**pti**

- Hasta el momento se ha abordado la *física atómica*, el estudio de las nubes de electrones que constituyen el átomo. Ahora se hurgará por debajo de los electrones y en lo más profundo del átomo, el núcleo atómico, donde las energías disponibles eclipsan aquellas que están disponibles para los electrones. Ésta es la *física nuclear*, un tema de gran interés público, y de temor público, no distinto del temor a la electricidad hace más de un siglo. Con medidas de seguridad y consumidores bien informados, la sociedad determinó que los beneficios de la electricidad superaban sus riesgos. Lo mismo ocurre en la actualidad con los riesgos de la tecnología nuclear frente a sus beneficios.

## 33.1 Los rayos X y la radiactividad

La investigación más profunda del átomo comenzó en 1895, cuando el físico alemán Wilhelm Roentgen descubrió los **rayos X**, rayos de una naturaleza desconocida. Roentgen descubrió este "nuevo tipo de rayos" producidos por un haz de "rayos catódicos" (después se descubrió que eran electrones) que golpeaba la superficie de vidrio de un tubo de descarga de gas. Descubrió que los rayos X podían atravesar materiales sólidos, eran capaces de ionizar el aire, no mostraban refracción en el vidrio y no los desviaban los campos magnéticos. En la actualidad se sabe que los rayos X son ondas electromagnéticas de alta frecuencia, por lo general emitidos por la desexcitación de los electrones orbitales más internos de los átomos. En tanto que la corriente de electrones en una lámpara fluorescente excita los electrones externos de los átomos y produce fotones ultravioletas y visibles, un haz de electrones más energético que golpea una superficie sólida excita los electrones más internos y produce fotones de radiación X con una frecuencia más alta.

Los fotones de rayos X tienen una energía alta y pueden penetrar muchas capas de átomos antes de ser absorbidos o dispersados. Los rayos X hacen esto cuando atraviesan tus tejidos blandos y producen una imagen de los huesos dentro de tu cuerpo (Figura 33.1). En un tubo de rayos X moderno, el blanco del haz de electrones es una placa metálica en lugar de la pared de vidrio del tubo.

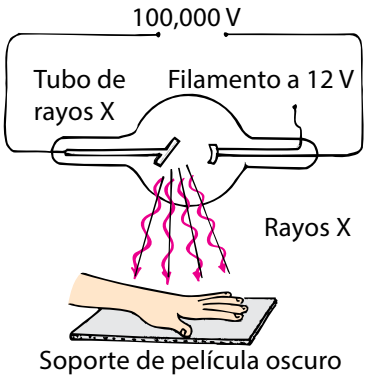



**FIGURA 33.1**
Los rayos X emitidos por los átomos metálicos que se excitan en el electrodo penetran en la carne con más facilidad que en el hueso y producen una imagen sobre la película.

A principios de 1896, pocos meses después de que Roentgen anunciara su descubrimiento de los rayos X, el físico francés Antoine Henri Becquerel se topó con un nuevo tipo de radiación penetrante. Becquerel estaba estudiando la fluorescencia y la fosforescencia creada tanto por la luz como por los rayos X recién descubiertos, y una tarde dejó una placa fotográfica envuelta dentro de un cajón junto a algunos cristales que contenían uranio. Al día siguiente descubrió para su sorpresa que la placa fotográfica estaba oscurecida, al parecer por una radiación espontánea proveniente del uranio. Siguió adelante y demostró que esta nueva radiación podía ionizar el aire y difería de los rayos X en que podía desviarse mediante campos eléctricos y magnéticos.

Pronto descubrió que otros elementos emitían rayos similares, como el torio, el actinio y dos nuevos elementos descubiertos por Marie y Pierre Curie: el polonio y el radio. La emisión de estos rayos demostraba que había cambios mucho más drásticos en el átomo que la excitación atómica. Estos rayos, como se evidenció, eran resultado no de cambios en los estados de energía de los electrones, sino de cambios que ocurrían en el interior del centro del átomo: el núcleo. Este proceso es la **radiactividad**, que, por implicar el decaimiento del núcleo atómico, con frecuencia se denomina *decaimiento radiactivo*.

Una idea equivocada frecuente es que la radiactividad es algo nuevo en el ambiente, pero ha estado aquí mucho más tiempo que la especie humana. Forma parte del ambiente tanto como el Sol y la lluvia. Siempre ha estado en el suelo por el que caminas y en el aire que respiras, y es lo que calienta el interior de la Tierra y hace que se funda. De hecho, el decaimiento radiactivo en el interior de la Tierra es lo que calienta el agua que sale de un géiser o sube por los manantiales térmicos naturales. Inclusive el helio del globo de un niño no es más que el producto del decaimiento radiactivo. La radiactividad es tan natural como la luz solar y la lluvia.

**SCREENCAST: Radiactividad**

La radiactividad ha estado presente desde el comienzo de la Tierra.

**VIDEO: Decaimiento radiactivo**

## 33.2 Rayos alfa, beta y gamma

Más de 99.9% de los átomos del ambiente cotidiano son estables. Es poco probable que los núcleos de dichos átomos cambien durante la vida del Universo. Pero algunos tipos de átomos son inestables. Todos los elementos que tienen un número atómico mayor que 82 (plomo) son radiactivos. Estos elementos, y otros, emiten tres tipos distintos de radiación, llamados por las primeras tres letras del alfabeto griego, α, β, γ: *alfa*, *beta* y *gamma*.

Los **rayos alfa** tienen carga eléctrica positiva, los **rayos beta** tienen carga eléctrica negativa y los **rayos gamma** no tienen carga (Figura 33.2). Los tres rayos pueden separarse si se coloca un campo magnético a través

**FIGURA 33.2**
Un rayo gamma es parte del espectro electromagnético. Es simplemente radiación electromagnética que tiene una frecuencia y una energía mucho mayores que la luz y los rayos X.

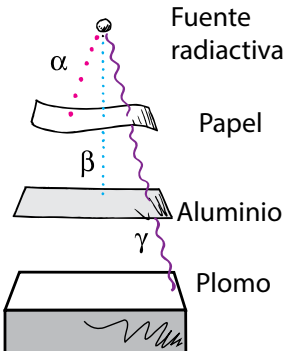



**FIGURA 33.3**
Las partículas alfa son las menos penetrantes y pueden detenerse con unas cuantas hojas de papel. Las partículas beta atraviesan con facilidad el papel, pero no una hoja de aluminio. Los rayos gamma penetran varios centímetros en el plomo sólido.

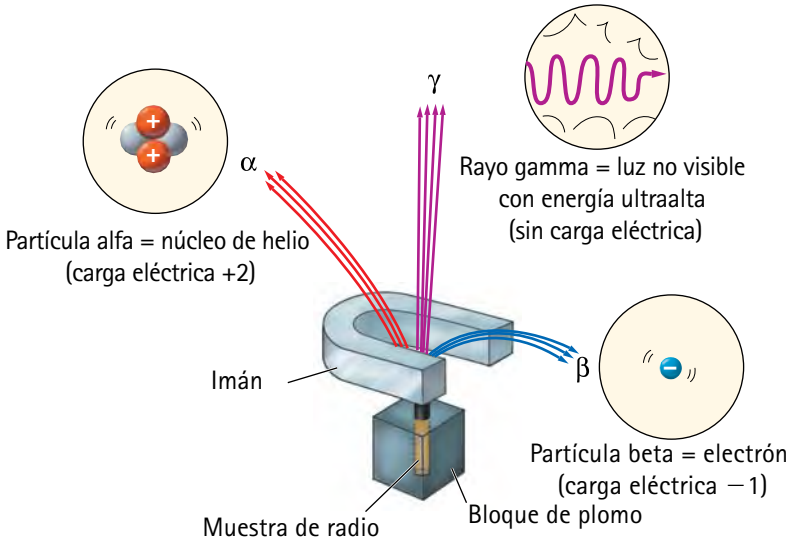



**FIGURA 33.4**
En un campo magnético, los rayos alfa se doblan en un sentido, los rayos beta se doblan en el otro sentido y los rayos gamma no se doblan en absoluto. El haz combinado proviene de una fuente radiactiva colocada en el fondo de un orificio taladrado en un bloque de plomo.

**FIGURA 33.5**
La vida media de las fresas frescas y otros perecederos aumenta de manera importante cuando los alimentos son expuestos a los rayos gamma provenientes de una fuente radiactiva. Las fresas de la derecha fueron tratadas con radiación gamma, que mata los microorganismos que suelen ocasionar su descomposición. El alimento sólo es receptor de la radiación y de ninguna manera se transforma en emisor de radiación, como puede confirmarse con un detector de radiación.

de sus trayectorias (Figura 33.4). Hay otras investigaciones que demuestran que un rayo alfa es un chorro de núcleos de helio y un rayo beta es un chorro de electrones. Por tanto, con frecuencia se les llama *partículas alfa* y *partículas beta*. Un rayo gamma es radiación electromagnética (un chorro de fotones) cuya frecuencia es incluso más alta que la de los rayos X. Mientras que los rayos X se originan en la nube de electrones afuera del núcleo atómico, los rayos alfa, beta y gamma se originan en el núcleo. De modo que, así como la luz se emite por las transiciones entre los niveles de energía en los átomos, los rayos gamma se emiten por transiciones de energía similares en el interior del núcleo atómico. Los fotones gamma ofrecen información de la estructura nuclear, así como los fotones visibles y los de rayos X ofrecen información de la estructura electrónica atómica.

Una vez que las partículas alfa y beta se frenan mediante colisiones, se combinan y se convierten en átomos de helio inofensivos.

## PUNTO DE CONTROL

**Supón que te entregan tres rocas radiactivas: una, un emisor alfa; otra, un emisor beta, y otra, un emisor gamma. Puedes lanzar una, pero de las otras dos, debes sostener una en la mano y colocar la otra en tu bolsillo. ¿Qué puedes hacer para reducir al mínimo tu exposición a la radiación?**

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

Sostén el emisor alfa en la mano, porque la piel de tu mano te protegerá. Coloca el emisor beta en tu bolsillo, porque es probable que el grosor de tu ropa junto con el de tu piel detengan las partículas beta. Lanza el emisor gamma, porque penetraría en tu cuerpo desde cualquiera de las ubicaciones anteriores. Desde luego, lo ideal es que te alejes lo más posible de todas las rocas.

## 33.3 Radiación ambiental

Las rocas y minerales comunes del ambiente contienen cantidades significativas de isótopos radiactivos porque muchos contienen pequeñas cantidades de uranio. De hecho, las personas que viven en edificios de ladrillo, concreto o piedra están expuestas a mayores cantidades de radiación que las personas que viven en construcciones de madera.

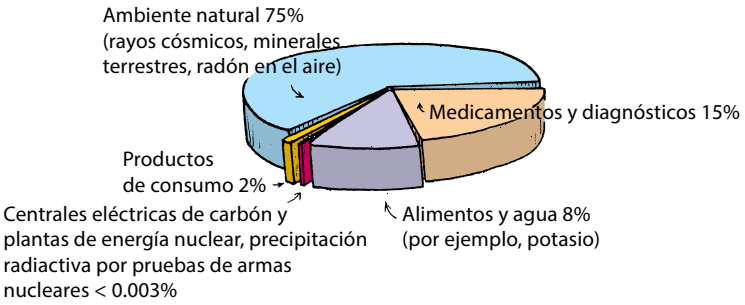



**FIGURA 33.6**
Orígenes de la exposición a la radiación para un individuo promedio en Estados Unidos.

La principal fuente de radiación que ocurre de manera natural es el radón-222, un gas inerte que surge de los depósitos de uranio. El radón es un gas pesado que tiende a acumularse en los sótanos después de que se filtra por las grietas del piso. Los niveles de radón varían de una región a otra, de acuerdo con la geología local. Puedes comprobar el nivel de radón en tu casa con un detector de radón (Figura 33.7). Si los niveles son anormalmente altos, se recomiendan medidas correctivas, como sellar el suelo y las paredes del sótano y mantener una ventilación adecuada.

Aproximadamente un sexto de la exposición anual a la radiación proviene de fuentes no naturales, sobre todo de procedimientos médicos. Los detectores de humo, la precipitación radiactiva de pruebas nucleares realizadas hace mucho tiempo, así como las centrales eléctricas de carbón y la industria de la energía nuclear también contribuyen. La industria del carbón supera por mucho a la industria nuclear como fuente de radiación. De manera global, la combustión de carbón libera anualmente a la atmósfera alrededor de 13,000 toneladas de torio y uranio radiactivos. Estos dos minerales se encuentran de manera natural en los depósitos de carbón, de modo que su liberación es una consecuencia natural de la quema de carbón. En todo el mundo, las industrias de energía nuclear generan aproximadamente 10,000 toneladas de desechos radiactivos al año. Sin embargo, la mayor parte de este desecho está almacenado y *no* se libera al ambiente.

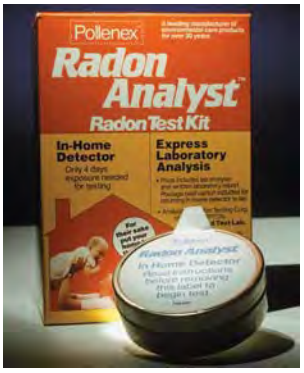



**FIGURA 33.7**
Un kit de prueba de radón doméstico a la venta en el comercio. Al recipiente se le quita el sello en el área que se va a muestrear. El radón que se filtra en el recipiente es absorbido por carbón activado. Después de varios días el recipiente vuelve a sellarse y se envía a un laboratorio para determinar el nivel de radón.

### Unidades de radiación

La dosis de radiación suele medirse en **rads** (*r*adiation *a*bsorbed *d*ose = dosis de radiación absorbida), una unidad de energía absorbida. Un rad es igual a 0.01 joules de energía radiante absorbida por kilogramo de tejido.

Sin embargo, la capacidad de la radiación nuclear para producir daño no sólo depende de su nivel de energía. Algunas formas de radiación son más dañinas que otras. Por ejemplo, supón que tienes dos flechas, una con una punta afilada y otra con una ventosa en la punta. Dispara ambas flechas hacia una manzana con la misma rapidez y ambas tendrán la misma energía cinética. No obstante, la que tiene la punta afilada invariablemente causará más daño a la manzana que la que tiene la ventosa. De igual manera, algunas formas de radiación causan mayor daño que otras aun cuando se reciba el mismo número de rads de ambas formas.

| Partícula | Dosis de radiación | | Factor | | Efecto a la salud |
|---|---|---|---|---|---|
| alfa | 1 rad | × | 10 | = | 10 rems |
| beta | 10 rad | × | 1 | = | 10 rems |

La unidad de medida de la dosis de radiación basada en el daño potencial es el **rem** (*r*oentgen *e*quivalent *m*an = roentgen equivalente en un ser humano).[1] Para calcular la dosis en rems, se multiplica el número de rads por un factor que corresponde a diferentes efectos en la salud de distintos tipos de radiación determinado por estudios clínicos. Por ejemplo, 1 rad de partículas alfa tiene el mismo efecto biológico que 10 rads de partículas beta.[2] A estas dos dosis se les refiere como 10 rems.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Qué es más dañino: estar expuesto a 1 rad de partículas alfa o a 1 rad de partículas beta?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Partículas alfa. Multiplica estas cantidades de radiación por el factor adecuado para obtener las dosis en rems. Alfa: 1 rad × 10 = 10 rems; beta: 1 rad × 1 = 1 rem. Los factores muestran que, en términos fisiológicos, las partículas alfa son 10 veces más dañinas que las partículas beta.

**FIGURA 33.8**
La radiación nuclear se concentra sobre el tejido dañino, como un tumor canceroso, para destruir o disminuir de tamaño en forma selectiva el tejido en una técnica conocida como *radioterapia*. Esta aplicación de la radiación nuclear ha salvado millones de vidas, un claro ejemplo de los beneficios de la tecnología nuclear. El recuadro muestra el símbolo internacional que indica que es un área donde se manipula o se produce material radiactivo.

## Dosis de radiación

Las dosis letales de radiación comienzan con 500 rems para una dosis de cuerpo entero. Una persona tiene alrededor de 50% de posibilidades de sobrevivir a una dosis de esta magnitud suministrada a todo el cuerpo durante un breve periodo, como un día o menos. Durante la radioterapia, un paciente puede recibir dosis *localizadas* que superan los 200 rems diarios durante un periodo de semanas (Figura 33.8).

Toda la radiación que recibes de fuentes naturales y de procedimientos de diagnóstico médico sólo es una fracción de 1 rem por año. Por conveniencia se usa la unidad más pequeña *milirem*, donde 1 milirem (mrem) es 1/1,000 de rem. La persona promedio en Estados Unidos está expuesta a más o menos 360 mrem al año, como indica la Tabla 33.1. Cerca de 80% de esta radiación proviene de fuentes naturales, como los rayos cósmicos y la Tierra misma. Una radiografía común de tórax expone a una persona a entre 5 y 30 mrem (0.005 a 0.030 rem), menos de un diezmilésimo de la dosis letal. Es interesante que el cuerpo humano sea una fuente significativa de radiación natural, principalmente por el potasio que se ingiere. Tu cuerpo contiene alrededor de 200 gramos de potasio. La mayor parte del potasio no es radiactivo. Éste es potasio-39, con 19 protones y 20 neutrones en su núcleo. Sin embargo, el potasio-40, con su neutrón adicional, *es* radiactivo. Los isótopos potasio-39 y potasio-40 son químicamente idénticos, excepto por los efectos de sus diferentes masas. De todo el potasio de tu cuerpo, alrededor de 20 miligramos es el isótopo radiactivo potasio-40, que es un emisor de rayos gamma. Entre cada latido cardiaco alrededor de 60,000 isótopos de potasio-40 en el cuerpo humano promedio experimentan un decaimiento radiactivo espontáneo. La radiación, en efecto, está en todas partes.

Cuando la radiación se encuentra con las moléculas de estructura intrincada de la solución salina, rica en iones, de las que se componen las células, la radiación puede crear caos a escala atómica. Algunas moléculas se rompen y este cambio altera a las demás moléculas, lo que puede ser nocivo para los procesos vitales.

[1]Esta unidad se llama así en honor de Wilhelm Roentgen, el descubridor de los rayos X.

[2]Esto es cierto aun cuando las partículas beta tengan más poder de penetración, como se señaló antes.

**TABLA 33.1 EXPOSICIÓN ANUAL A LA RADIACIÓN**

| Fuente | Dosis común (mrem) que se recibe anualmente |
|---|---|
| ***Origen natural*** | |
| Radiación cósmica | 26 |
| Suelo | 33 |
| Aire (radón-222) | 198 |
| Tejidos humanos (K-40; Ra-226) | 35 |
| ***Origen humano*** | |
| Procedimientos médicos | |
| Diagnóstico con rayos X | 40 |
| Diagnósticos nucleares | 15 |
| Productos de consumo | 8 |
| Precipitación radiactiva de pruebas de armas nucleares | 1 |
| Plantas eléctricas comerciales de combustible fósil | $<1$ |
| Plantas de energía nuclear comerciales | $\ll 1$ |

**FIGURA 33.9**
Los dosímetros de película que usan Tammy y Larry contienen alertas sonoras tanto para un pico de radiación como para la exposición acumulada. La información de los dosímetros individualizados se descarga en forma periódica a una base de datos para su análisis y almacenamiento.

Las células pueden reparar mucho del daño molecular causado por la radiación si ésta no es muy fuerte. Una célula puede sobrevivir a una dosis de radiación que normalmente sería letal si la dosis se distribuye durante un periodo largo para permitir que haya intervalos de curación. Cuando la radiación es suficiente para destruir células, las células muertas pueden sustituirse con unas nuevas (excepto en el caso de la mayoría de las células del tejido nervioso, que son irremplazables). En ocasiones una célula irradiada sobrevivirá con una molécula de ADN dañada. Las nuevas células que surjan a partir de la célula dañada conservarán la información genética alterada, lo que produce una *mutación*. Por lo general, los efectos de una mutación son insignificantes, pero a veces la mutación resulta en células que no funcionan tan bien como las no afectadas, lo que en ocasiones conduce al cáncer. Si el ADN dañado está en las células reproductoras de la persona, el código genético de su descendencia puede conservar la mutación.

## Trazadores radiactivos

En los laboratorios científicos se han producido muestras radiactivas de todos los elementos. Esto se logra mediante el bombardeo con neutrones u otras partículas. Los materiales radiactivos son en extremo útiles en la investigación científica y la industria. Para comprobar la acción de un fertilizante, por ejemplo, los investigadores combinan una pequeña cantidad de material radiactivo con el fertilizante y luego aplican la combinación a algunas plantas. La cantidad de fertilizante radiactivo que sube por las plantas puede medirse de manera fácil con detectores de radiación. Con dichas mediciones, los científicos pueden informar a los campesinos la cantidad adecuada de fertilizante que debe usarse. Los isótopos radiactivos que se utilizan para rastrear tales rutas se denominan *trazadores*.

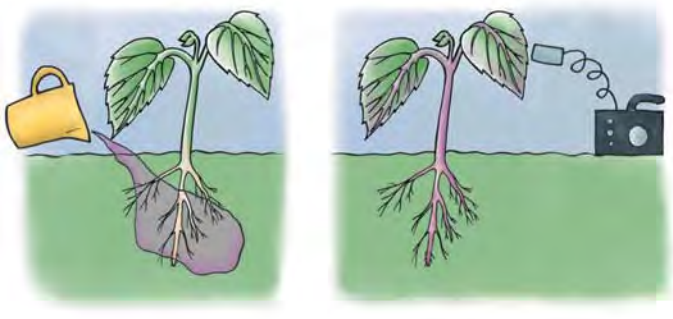
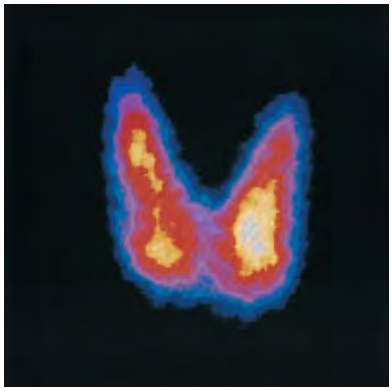


**FIGURA 33.10**
Rastreo de la absorción de fertilizante con un isótopo radiactivo.

**FIGURA 33.11**
La glándula tiroides, ubicada en el cuello, absorbe mucho del yodo que entra en el cuerpo por los alimentos y las bebidas. Para obtener imágenes de la glándula tiroides, como la que se muestra aquí, se da al paciente una pequeña cantidad del isótopo radiactivo yodo-131. Estas imágenes permiten diagnosticar trastornos metabólicos.



En una técnica conocida como diagnóstico médico por imagen, se usan trazadores para el diagnóstico de trastornos internos. Esta técnica funciona porque la trayectoria que sigue el trazador sólo es influida por sus propiedades físicas y químicas, no por su radiactividad. El trazador puede introducirse solo o junto con alguna otra sustancia química que ayude a dirigir el trazador hacia un tipo particular de tejido corporal.

**pti**

- Entre las partículas fundamentales de la naturaleza están seis tipos de *quarks*, de los cuales dos son los bloques constructores fundamentales de todos los nucleones (protones y neutrones). Los quarks portan cargas eléctricas fraccionarias. Un tipo de ellos, el quark *arriba* (up), porta +2/3 la carga del protón, y otro, el quark *abajo* (down), tiene −1/3 la carga del protón. (El nombre *quark*, inspirado por una cita de *Finnegans Wake*, de James Joyce, lo eligió en 1963 Murray Gell-Mann, quien propuso por primera vez su existencia.) Los quarks en el protón son la combinación *arriba arriba abajo*, y en el neutrón, *arriba abajo abajo*. Los otros cuatro quarks llevan los caprichosos nombres de *extraño* (strange), *encanto* (charm), *cima* (top) y *fondo* (bottom). Ningún quark ha sido aislado ni observado en forma experimental. La mayoría de los teóricos piensan que los quarks, por su naturaleza, no pueden aislarse.

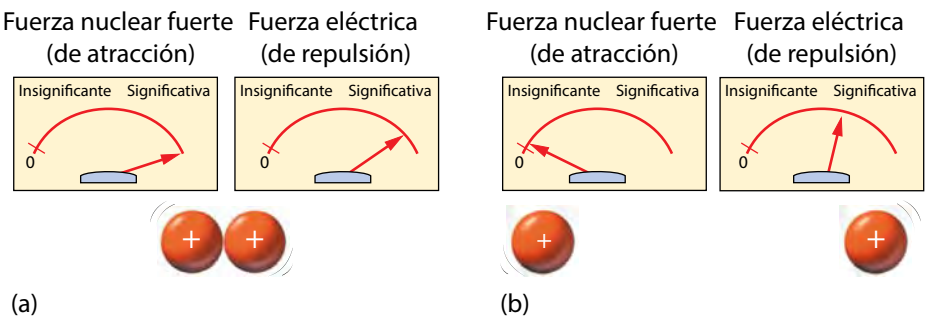
## 33.4 El núcleo atómico y la fuerza fuerte

El núcleo atómico ocupa sólo algunas cuatrillonésimas partes del volumen del átomo, por lo que la mayor parte del átomo es espacio vacío. El núcleo está compuesto de **nucleones**, que es el nombre colectivo para los protones y los neutrones. (Cada nucleón está compuesto de tres partículas más pequeñas llamadas **quarks**, que se consideran fundamentales y no compuestos de partes más pequeñas.)

Así como hay niveles de energía para los electrones orbitales de un átomo, hay niveles de energía en el interior del núcleo. Mientras que los electrones en órbita emiten fotones cuando realizan transiciones hacia órbitas más bajas, cambios similares de estados de energía en los núcleos radiactivos resultan en la emisión de fotones de rayos gamma. Ésta es la radiación gamma.

Se sabe que las cargas eléctricas del mismo signo se repelen. Así que, ¿cómo es posible que los protones, con carga positiva, en el núcleo permanezcan amontonados y juntos? Esta pregunta condujo al descubrimiento de una atracción llamada **fuerza fuerte**, que actúa entre todos los nucleones. Esta fuerza es muy intensa, pero sólo sobre distancias extremadamente cortas (más o menos $10^{-15}$ m, el diámetro aproximado de un protón o un neutrón). Por otra parte, las interacciones eléctricas de repulsión son relativamente de largo alcance. La Figura 33.12 sugiere una comparación de las intensidades de estas dos fuerzas en relación con la distancia. Para los protones que están juntos, como en un núcleo pequeño, la fuerza fuerte de atracción supera con facilidad la fuerza eléctrica de repulsión. Pero para los protones que están separados, como los que se encuentran en los extremos opuestos de un núcleo grande, la fuerza fuerte de atracción puede ser más débil que la fuerza eléctrica de repulsión.

**FIGURA 33.12**
Lecturas de un medidor imaginario que comparan fuerzas: (a) dos protones cercanos experimentan tanto una fuerza fuerte de atracción como una fuerza eléctrica de repulsión. A esta pequeña distancia de separación, la fuerza fuerte supera a la fuerza eléctrica, y permanecen juntos. (b) Cuando los protones están separados, la fuerza eléctrica predomina y se repelen. Esta repulsión protón-protón en los núcleos atómicos grandes reduce la estabilidad nuclear.



Un núcleo grande no es tan estable como uno pequeño. En un núcleo de helio, por ejemplo, cada uno de los dos protones siente el efecto de repulsión del otro. En un núcleo de uranio, ¡cada uno de los 92 protones siente los efectos de repulsión de los otros 91 protones! El núcleo es inestable. Se observa que existe un límite para el tamaño del núcleo atómico. Por esta razón los isótopos estables de los átomos más grandes tienen cada vez más neutrones que protones en sus núcleos, y todos los núcleos que tienen más de 82 protones son radiactivos (el número 83, bismuto, apenas lo es).

Sin la fuerza nuclear fuerte —una interacción fuerte— no habría átomos más allá del hidrógeno.

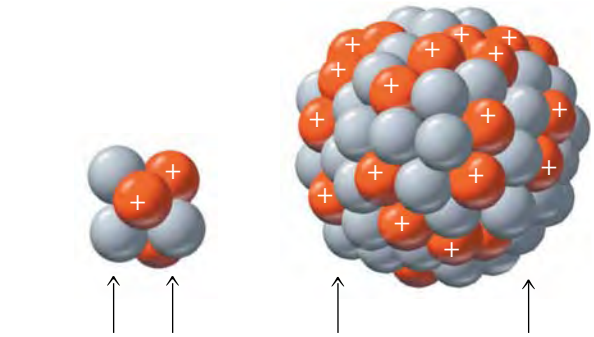



**FIGURA 33.13**
(a) Todos los nucleones de un núcleo atómico pequeño están muy juntos; por tanto, experimentan una fuerza fuerte de atracción. (b) Los nucleones en lados opuestos de un núcleo más grande no están tan juntos y, por tanto, la fuerza fuerte de atracción que los mantiene juntos es mucho más débil. El resultado es que el núcleo grande es menos estable.

**PUNTO DE CONTROL**

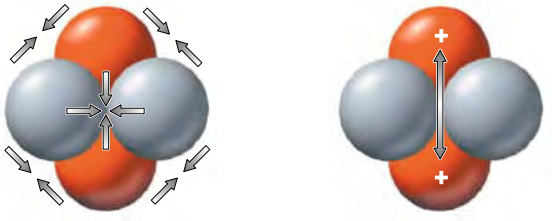
**Dos protones del núcleo atómico se repelen mutuamente, pero también se atraen uno al otro. ¿Por qué?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Dos fuerzas están en acción: la eléctrica y la nuclear. Aunque los protones se repelen eléctricamente uno a otro, también se atraen en forma simultánea por la fuerza fuerte. Cuando la fuerza fuerte de atracción es más intensa que la fuerza eléctrica de repulsión, los protones permanecen unidos. Cuando los protones están separados, la fuerza eléctrica puede superar a la fuerza nuclear y tienden a separarse.

SCREENCAST: La fuerza nuclear fuerte

Los neutrones funcionan como un "cemento nuclear" que mantiene unido al núcleo atómico. Los protones atraen tanto a los protones como a los neutrones mediante la fuerza fuerte. Los protones también repelen a otros protones mediante la fuerza eléctrica. Los neutrones, por otra parte, no tienen carga eléctrica y, por tanto, sólo atraen a otros protones y neutrones mediante la fuerza fuerte. En consecuencia, la presencia de neutrones se agrega a la atracción entre nucleones y ayuda a mantener unido al núcleo (Figura 33.14).



Todos los nucleones, tanto los protones como los neutrones, se atraen entre sí mediante la fuerza nuclear fuerte.

Sólo los protones se repelen entre sí mediante la fuerza eléctrica.

**FIGURA 33.14**
La presencia de neutrones ayuda a mantener unido al núcleo porque aumenta el efecto de la fuerza fuerte, representada con las flechas de una sola punta.

Mientras más protones haya en un núcleo, más neutrones se necesitarán para ayudar a equilibrar las fuerzas eléctricas de repulsión. En el caso de los elementos

ligeros, es suficiente tener más o menos tantos neutrones como protones. El isótopo más común del carbono, el C-12, por ejemplo, tiene igual número de cada uno: seis protones y seis neutrones. Para núcleos grandes se necesitan más neutrones que protones. Puesto que la fuerza fuerte disminuye de manera rápida con la distancia, los nucleones casi deben tocarse para que la fuerza fuerte sea efectiva. Los nucleones en lados opuestos de un gran núcleo atómico no se atraen tanto entre sí. Sin embargo, la fuerza eléctrica no disminuye mucho a través del diámetro de un núcleo grande y, por tanto, comienza a ganar sobre la fuerza fuerte. Para compensar el debilitamiento de la fuerza fuerte a través del diámetro del núcleo, los núcleos grandes tienen más neutrones que protones. El plomo, por ejemplo, tiene casi una y media veces más neutrones que protones.

Por lo que se ve, los neutrones son estabilizadores y los núcleos grandes necesitan muchos de ellos, hasta llegar a un punto después del cual ni siquiera los neutrones pueden mantener unido al núcleo. Es interesante que los neutrones no sean estables cuando están solos. Un neutrón solo es radiactivo y se transforma de manera espontánea en un protón y un electrón (Figura 33.15a). Un neutrón necesita protones alrededor para impedir que esto ocurra. Las partículas alfa emitidas en el decaimiento alfa literalmente son "pedazos" de núcleo, y sólo los núcleos pesados los emiten.[3] Las partículas beta y gamma, por otra parte, pueden ser emitidas por núcleos radiactivos tanto pesados como ligeros. En la Figura 33.15b se muestran el decaimiento beta de un solo neutrón y el decaimiento alfa de un núcleo pesado.

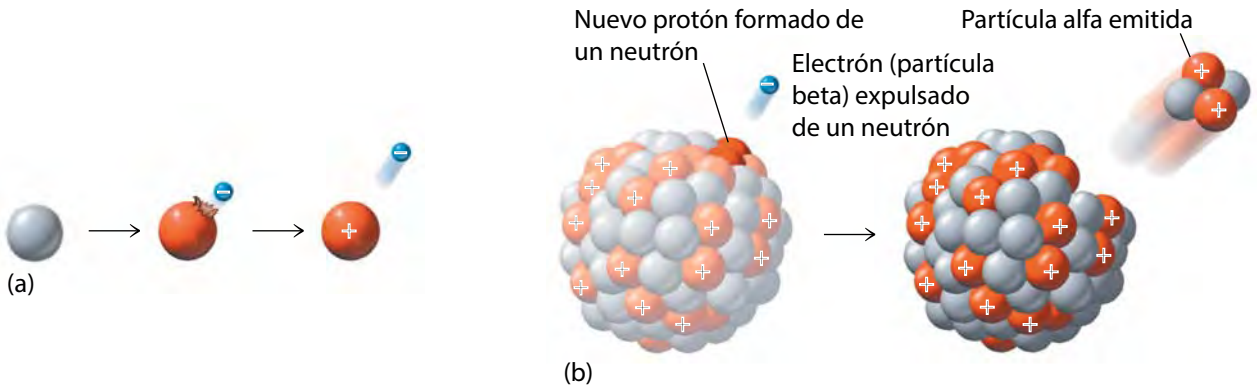



**FIGURA 33.15**
(a) Un neutrón cerca de un protón es estable, pero un neutrón por sí solo es inestable y decae en un protón al emitir un electrón. (b) Desestabilizado por un aumento del número de protones, el núcleo comienza a perder fragmentos, como las partículas alfa.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Qué función tienen los neutrones en el núcleo atómico? ¿Cuál es el destino de un neutrón cuando está solo o alejado de uno o más protones?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

Los neutrones funcionan como cemento nuclear en los núcleos y le añaden estabilidad al núcleo. Pero cuando está solo, un neutrón es radiactivo y se transforma de manera espontánea en un protón y un electrón.

[3]Una excepción a la regla de que el decaimiento alfa se limita a los núcleos pesados es el núcleo enormemente radiactivo del berilio-8, con cuatro protones y cuatro neutrones, que se divide en dos partículas alfa —una forma de fisión nuclear—.

## 33.5 Vida media radiactiva

La tasa de decaimiento radiactivo de un elemento se mide en términos de un tiempo característico, la **vida media**. Éste es el tiempo que tarda en decaer la mitad de la cantidad original de un isótopo radiactivo. El radio-226, por ejemplo, tiene una vida media de 1,620 años. Esto significa que la mitad de cualquier espécimen dado de radio-226 decaerá en otros elementos después de transcurrir 1,620 años. En los siguientes 1,620 años, la mitad del radio restante decaerá, lo que dejará sólo un cuarto de la cantidad original de radio (después de 20 vidas medias, la cantidad inicial de radio-226 disminuirá por un factor de más o menos 1 millón).

VIDEO: Vida media

SCREENCAST: Vida media radiactiva

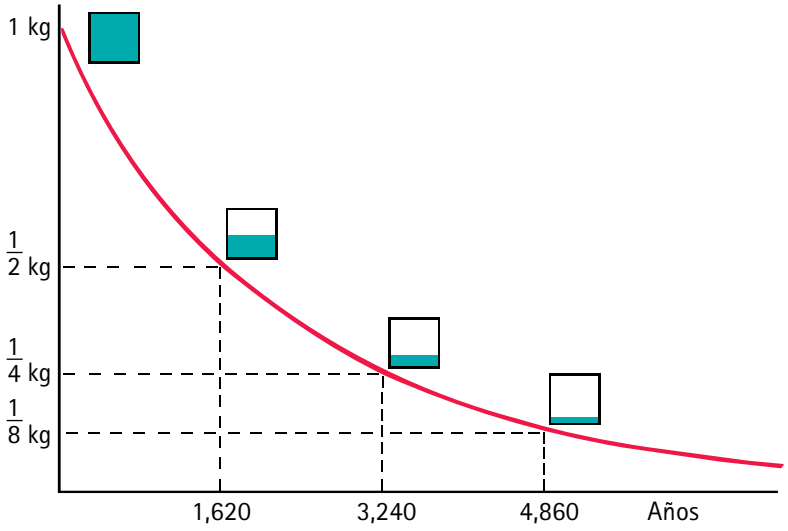



**FIGURA 33.16**
Cada 1,620 años, la cantidad de radio disminuye a la mitad.

Las vidas medias son notablemente constantes y no las afectan las condiciones externas. Algunos isótopos radiactivos tienen vidas medias que son menos de una millonésima de segundo, en tanto que otros tienen vidas medias de más de mil millones de años. El uranio-238 tiene una vida media de 4.5 mil millones de años. Con el tiempo, todo el uranio decae en una serie de pasos hasta plomo. En 4.5 mil millones de años, la mitad del uranio presente en la Tierra hoy será plomo.

No es necesario esperar toda una vida media para medirla. La vida media de un elemento puede calcularse en cualquier momento dado con sólo medir la tasa de decaimiento de una cantidad conocida. Esto se hace de manera fácil con un detector de radiación. En general, cuanto más corta sea la vida media de una sustancia, más rápido se desintegrará, y se detectará más radiactividad por cantidad de material.

La vida media radiactiva de un material también es el tiempo en el que su tasa de decaimiento se reduce a la mitad.

**PUNTO DE CONTROL**

**Si una muestra de isótopos radiactivos tiene una vida media de 1 día, ¿cuánto de la muestra original quedará al final del segundo día? ¿Del tercer día?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

Un cuarto al final del segundo día, un octavo al final del tercer día.

**pti**

- Cualquier cantidad que disminuya a la mitad durante intervalos iguales de tiempo, se dice que decae exponencialmente. Cualquier cantidad que aumente al doble durante intervalos iguales de tiempo, se dice que crece exponencialmente. ¡Asegúrate de leer sobre el crecimiento exponencial en el Apéndice E!

## 33.6 Detectores de radiación

Los movimientos térmicos ordinarios de los átomos que chocan entre sí en un gas o en un líquido no son lo suficientemente energéticos como para desprender electrones y los átomos permanecen neutrales. Pero cuando una partícula energética, como una partícula alfa o una beta, se dispara a través de la materia, los electrones son desprendidos uno tras otro de los átomos en la trayectoria de la partícula. El resultado es un rastro de electrones liberados e iones con carga positiva. Este proceso de ionización es el que causa los efectos dañinos de la radiación de alta energía en las células vivas. La ionización también hace relativamente sencillo rastrear las trayectorias de las partículas de alta energía. A continuación se hará una breve presentación de cinco dispositivos para la detección de radiación.

(a)

(b)

**FIGURA 33.17**
Detectores de radiación. (a) Un contador Geiger detecta la radiación entrante mediante un corto pulso de corriente que es disparado cuando la radiación ioniza un gas en el interior del tubo. (b) Un contador de centelleo indica la radiación entrante mediante los destellos de luz producidos cuando las partículas cargadas o los rayos gamma pasan por el contador.

**1.** Un *contador Geiger* consiste en un alambre central que está en un cilindro de metal hueco lleno de gas a baja presión. A través del cilindro y el alambre se aplica un voltaje eléctrico, de modo que el alambre es más positivo que el cilindro. Si la radiación entra en el tubo e ioniza un átomo del gas, el electrón liberado es atraído hacia el alambre central con carga positiva. A medida que este electrón acelera hacia el alambre, choca con otros átomos y desprende más electrones, los cuales, a su vez, producen más electrones, y así sucesivamente, lo que resulta en una cascada de electrones que se mueven hacia el alambre. Esto produce un corto pulso de corriente eléctrica, que activa un dispositivo de conteo conectado al tubo. Cuando se amplifica, este pulso de corriente produce el familiar chasquido que se asocia con los detectores de radiación.

**2.** Una *cámara de niebla* muestra una trayectoria visible de la radiación ionizante en forma de rastros de neblina. Consiste en una cámara cilíndrica cerrada en el extremo superior con una ventana de vidrio, y en el extremo inferior con un pistón móvil. El vapor de agua o el vapor de alcohol en el interior de la cámara pueden saturarse al ajustar el pistón. La fuente de radiación puede estar afuera de la cámara o en su interior, como se muestra en la Figura 33.18. Cuando una partícula cargada pasa por la cámara, se producen iones a lo largo de su trayectoria. Si entonces el aire saturado en la cámara se enfría de manera súbita por el movimiento del pistón, pequeñas gotas de humedad se condensan en torno a estos iones y forman rastros de vapor, que muestran las trayectorias de la radiación. Éstas son las versiones atómicas de los rastros de cristal de hielo que dejan en el cielo los aviones jet.

**FIGURA 33.18**
Una cámara de niebla. Las partículas cargadas que se mueven a través del vapor supersaturado dejan rastros. Cuando la cámara está en un intenso campo eléctrico o magnético, el doblamiento de las trayectorias proporciona información de la carga, la masa y la cantidad de movimiento de las partículas.

La cámara de niebla continua es incluso más simple. Contiene un vapor supersaturado estable porque descansa sobre una placa de hielo seco, con un gradiente de temperatura que va desde casi la temperatura ambiente en la parte superior hasta una temperatura muy baja en la parte inferior. Los rastros de niebla que se forman son iluminados con una lámpara y pueden verse o fotografiarse a través de la ventana superior. La cámara puede colocarse en un intenso campo eléctrico o magnético, que doblará las trayectorias en una forma que ofrece información de la carga, la masa y la cantidad de movimiento de las partículas de radiación.

Las cámaras de niebla, que fueron herramientas muy importantes en las primeras investigaciones de los rayos cósmicos, se utilizan en la actualidad

principalmente con propósitos didácticos. Quizás tu instructor te muestre alguna, como lo hace Walter Steiger en la Figura 33.19.[4]

3. Los rastros de las partículas que se ven en una *cámara de burbujas* son diminutas burbujas de gas en hidrógeno líquido (Figura 33.20). El hidrógeno líquido se calienta bajo presión en una cámara de vidrio y acero inoxidable hasta un punto cercano a la ebullición. Si la presión en la cámara se libera en forma súbita al momento en que entra una partícula productora de iones, un pequeño rastro de burbujas queda a lo largo de la trayectoria de la partícula. Después, todo el líquido hierve pero, en las pocas milésimas de segundo antes de que esto ocurra, se toman fotografías del rastro con corta vida de la partícula. Al igual que con la cámara de niebla, un campo magnético en la cámara de burbujas revela información sobre la carga y la masa relativa de las partículas que se estudian. Las cámaras de burbujas se usaron de manera generalizada en la investigación en décadas pasadas, pero en la actualidad hay un mayor interés por las cámaras de chispas.

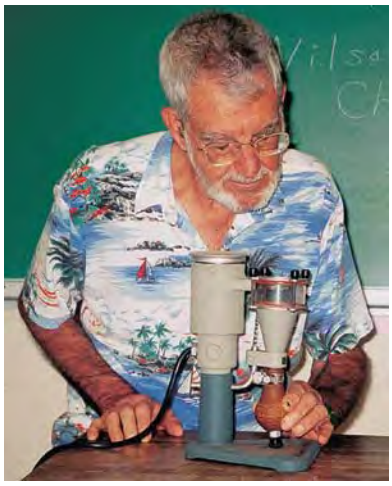


**FIGURA 33.19**
Walter Steiger examina rastros de vapor en una pequeña cámara de niebla.

**FIGURA 33.20**
Rastros de partículas elementales en una cámara de burbujas. (El ojo experimentado distingue que dos partículas se destruyeron en el punto desde el cual emanan las espirales, y en la colisión se crearon otras cuatro.)

4. Una *cámara de chispas* es un dispositivo de conteo que consiste en un arreglo de placas paralelas con espacios estrechos entre sí. Las placas se aterrizan de forma alternada y las placas que se ubican en medio de las aterrizadas se mantienen a un voltaje alto (más o menos 10 kV). Los iones se producen en el gas entre las placas cuando las partículas cargadas pasan por la cámara. La descarga a lo largo de la trayectoria iónica produce una chispa visible entre pares de placas. Un rastro de muchas chispas revela la trayectoria de la partícula. Un diseño diferente, llamado *cámara de "streamer"*, consiste sólo en dos placas ampliamente espaciadas, entre las cuales una descarga eléctrica, o "streamer", sigue muy de cerca la trayectoria de la partícula cargada incidente. La principal ventaja de las cámaras de chispa y de *streamer* sobre la cámara de burbujas es que pueden monitorizarse más eventos en un tiempo determinado.
5. Un *contador de centelleo* aprovecha que ciertas sustancias se excitan con facilidad y emiten luz cuando las partículas cargadas o rayos gamma pasan a través de ellas. Pequeños destellos de luz, o centelleos, se convierten en señales eléctricas mediante tubos fotomultiplicadores especiales. Un contador de centelleos es mucho más sensible a los rayos gamma que un contador Geiger y, además, puede medir la energía de las partículas cargadas o rayos gamma absorbidos en el detector. El detector de radiación que Roger Rassool muestra en una de las fotografías al inicio del capítulo es un escintilador. Es interesante que el agua ordinaria, cuando está altamente purificada, pueda funcionar como un escintilador.

**FIGURA 33.21**
La Gran Cámara de Burbujas Europea (BEBC, por sus siglas en inglés) en el CERN, cerca de Ginebra, es típica de las grandes cámaras de burbujas que se usaron en la década de 1970 para estudiar las partículas producidas por aceleradores de alta energía.

[4]Walter Steiger, el "padre de la astronomía" en Hawái y mi amigo personal cercano, murió en un accidente de tránsito en 2009. El edificio de ciencia y tecnología de la University of Hawaii en Hilo lleva su nombre en su honor.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Cuál produce una tasa de conteo más alta en un detector de radiación: un material radiactivo que tiene vida media corta o un material radiactivo que tiene vida media larga?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

El material con la vida media más corta es más activo y mostrará una mayor tasa de conteo en un detector de radiación.

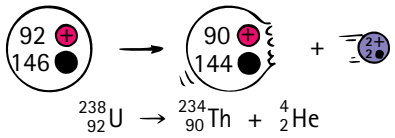
## 33.7 Transmutación de elementos

SCREENCAST: Transmutación

Cuando un núcleo radiactivo emite una partícula alfa o beta, hay un cambio en su número atómico: se forma un elemento diferente. El cambio de un elemento químico en otro se llama **transmutación**. La transmutación ocurre en eventos naturales y también se inicia de manera artificial en el laboratorio.

### Transmutación natural

Piensa en el uranio-238, cuyo núcleo contiene 92 protones y 146 neutrones. Cuando se expulsa una partícula alfa, el núcleo pierde dos protones y dos neutrones. Puesto que un elemento se define por el número de protones en su núcleo, los 90 protones y 144 neutrones que quedan ya no se identifican como uranio. Lo que se tiene es el núcleo de un elemento diferente: *torio*. Esta transmutación puede escribirse como una ecuación nuclear:



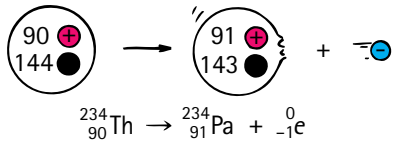

Se ve que $^{238}_{92}U$ transmuta a los dos elementos escritos a la derecha de la flecha. Cuando esta transmutación ocurre, se libera energía, parte en forma de energía cinética de la partícula alfa $^{4}_{2}He$, parte en la energía cinética del núcleo de torio y parte en forma de radiación gamma. En ésta, y en todas las ecuaciones similares, los números de masa en la parte superior se equilibran (238 = 234 + 4) y los números atómicos en la parte inferior también se equilibran (92 = 90 + 2).

El torio-234, el producto de esta reacción, también es radiactivo. Cuando decae, emite una partícula beta.[5] Debido a que una partícula beta es un electrón, el número atómico del núcleo resultante *aumenta* en 1. De este modo, después de la emisión beta del torio con 90 protones, el elemento resultante tiene 91 protones.

[5]La emisión beta siempre se acompaña de la emisión de un neutrino (en realidad, un antineutrino), una partícula neutra con masa casi cero que viaja aproximadamente a la rapidez de la luz. El neutrino ("pequeño neutro") fue postulado por Wolfgang Pauli en 1930 y detectado en 1956. Los neutrinos son difíciles de detectar porque interactúan de manera muy débil con la materia. Mientras que un pedazo de plomo sólido de unos centímetros de grosor detendrá la mayoría de los rayos gamma provenientes de una fuente de radio, se necesitaría un pedazo de plomo de unos 8 años-luz de grosor para detener a la mayoría de los neutrinos producidos en los decaimientos nucleares típicos. Miles de neutrinos vuelan a través tuyo cada segundo de cada día porque el Universo está lleno de ellos. Sólo ocasionalmente, una o dos veces al año más o menos, un neutrino interactúa con la materia de tu cuerpo.

Al momento de escribir este capítulo, se desconoce la masa exacta de los neutrinos, pero se ha establecido que no es más de alrededor de un millonésimo de la masa de un electrón. Sin embargo, los neutrinos son tan numerosos que podrían constituir la mayor parte de la masa del Universo. Los neutrinos pueden ser el "pegamento" que mantiene unido al Universo.

Ya no es torio, sino el elemento protactinio. Aunque en este proceso el número atómico aumentó por 1, el número de masa (protones + neutrones) permanece igual. La ecuación nuclear es:




Un electrón se escribe como $^{0}_{-1}e$. El superíndice 0 indica que la masa del electrón es insignificante en relación con la de los protones y neutrones. El subíndice −1 es la carga eléctrica del electrón. (Esta reacción y todas las emisiones beta están acompañadas de antineutrinos, que no se muestran en la figura.)

De este modo, se observa que, cuando un elemento expulsa una partícula alfa de su núcleo, el número de masa del átomo resultante disminuye en 4 y su número atómico disminuye en 2. El átomo resultante es un elemento que está dos espacios atrás en la tabla periódica de los elementos. Cuando un elemento expulsa una partícula beta de su núcleo, la masa del átomo prácticamente no es afectada, lo cual significa que no hay un cambio en el número de masa, pero su número atómico aumenta en 1. El átomo resultante pertenece a un elemento que está un lugar adelante en la tabla periódica. La emisión gamma no resulta en un cambio ni en el número de masa ni en el número atómico. Por ello, se ve que los elementos radiactivos pueden decaer hacia atrás o hacia adelante en la tabla periódica.[6]

En la Figura 33.22 se muestra la sucesión de decaimientos radiactivos de $^{238}_{92}\text{U}$ a $^{206}_{82}\text{Pb}$, un isótopo del plomo. Cada flecha azul muestra un decaimiento alfa y cada flecha roja muestra un decaimiento beta. Observa que algunos de los núcleos de la serie pueden decaer de ambas maneras. Ésta es una de varias series radiactivas similares que ocurren en la naturaleza.

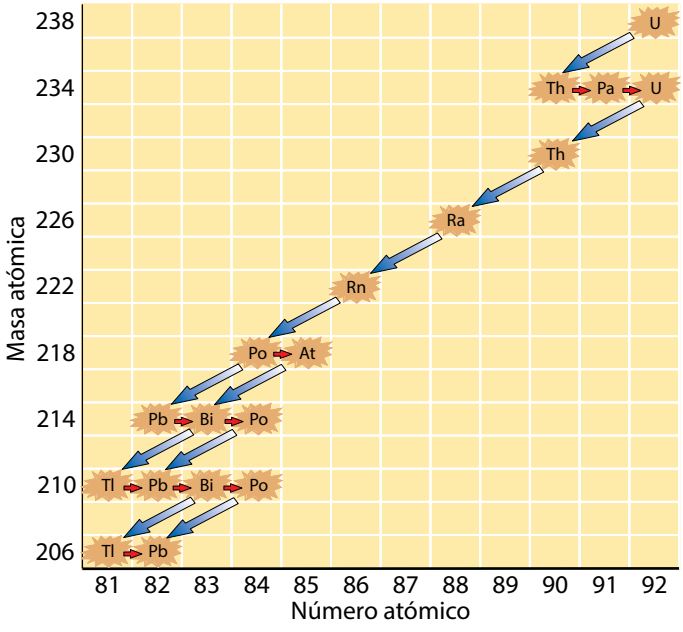



**FIGURA 33.22**
U-238 decae a Pb-206 a través de una serie de decaimientos alfa y beta.

Una tonelada de granito ordinario contiene alrededor de 9 gramos de uranio y 20 gramos de torio. Una tonelada de basalto contiene 3.5 gramos de uranio y 7.7 gramos de torio.

[6]En ocasiones un núcleo emite un positrón, que es la "antipartícula" de un electrón. En este caso, un protón se convierte en un neutrón, y el número atómico disminuye.

**PUNTO DE CONTROL**

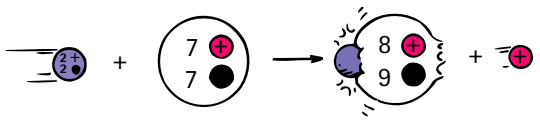
1. **Completa las siguientes reacciones nucleares:**
   a. $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{?}_{?}? + ^{0}_{-1}e$
   b. $^{209}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{205}_{82}\text{Pb} + ^{?}_{?}?$
2. **¿En qué se convierte finalmente todo el uranio que experimenta decaimiento radiactivo?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. a. $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{226}_{89}\text{Ac} + ^{0}_{-1}\text{e}$
   b. $^{209}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{205}_{82}\text{Pb} + ^{4}_{2}\text{He}$
2. A final de cuentas, todo el uranio se convierte en plomo. En el camino para convertirse en plomo, existirá como una serie de elementos, como se indica en la Figura 33.22.

## Transmutación artificial

Ernest Rutherford, en 1919, fue el primero de muchos investigadores en lograr transmutar de manera deliberada un elemento químico. Bombardeó gas nitrógeno con partículas alfa provenientes de un pedazo de material radiactivo. El impacto de una partícula alfa sobre un núcleo de nitrógeno puede transmutar el nitrógeno en oxígeno:




$$^{4}_{2}\text{He} + ^{14}_{7}\text{N} \rightarrow ^{17}_{8}\text{O} + ^{1}_{1}\text{H}$$

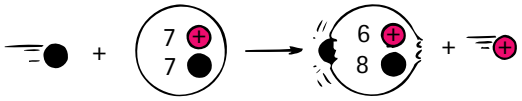
Rutherford usó una cámara de niebla para registrar este evento. A partir de un cuarto de millón de rastros de cámara de niebla fotografiados sobre una película, mostró siete ejemplos de transmutación atómica. El análisis de los rastros que se doblaron mediante un intenso campo magnético externo demostró que, en ocasiones, cuando una partícula alfa choca con un átomo de nitrógeno, un protón rebota y el átomo pesado retrocede una corta distancia. La partícula alfa desaparecía. La partícula alfa era absorbida en el proceso, lo que transformaba el nitrógeno en oxígeno.

Desde el anuncio de Rutherford en 1919, los investigadores han realizado muchas otras reacciones nucleares, primero con proyectiles de bombardeo naturales provenientes de fuentes radiactivas, y después con proyectiles aún más energéticos: protones y otras partículas arrojadas por enormes aceleradores de partículas. La transmutación artificial es lo que produce los hasta ahora desconocidos elementos sintéticos con números atómicos del 93 al 118. Todos estos elementos producidos artificialmente tienen vidas medias cortas. Cualquiera que pudiera haber existido de manera natural cuando la Tierra se formó decayó desde hace mucho tiempo.

# 33.8 Datación radiométrica

La atmósfera de la Tierra es bombardeada de manera continua por rayos cósmicos, y este bombardeo hace que transmuten muchos átomos en la atmósfera superior. Estas transmutaciones resultan en muchos protones y neutrones que se "rocían" al ambiente. La mayoría de los protones se detiene cuando chocan con los átomos de la atmósfera superior y desprenden electrones de dichos átomos para convertirse en átomos de hidrógeno. Sin embargo, los neutrones siguen su marcha durante distancias más largas porque no tienen carga eléctrica y, en consecuencia, no interactúan eléctricamente con la materia. Con el tiempo, muchos de ellos chocan con los núcleos en la atmósfera

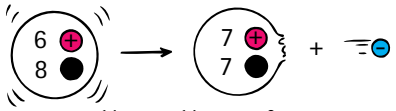
inferior más densa. Un núcleo de nitrógeno que captura un neutrón, por ejemplo, puede emitir un protón y convertirse en el núcleo de un isótopo de carbono:




$$^{1}_{0}n + {}^{14}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{14}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$$

Este isótopo carbono-14, que constituye aproximadamente una billonésima parte del carbono en la atmósfera, tiene ocho neutrones y es radiactivo. (El isótopo más común, el carbono-12, tiene seis neutrones y no es radiactivo.) Puesto que tanto el carbono-12 como el carbono-14 son formas de carbono, tienen las mismas propiedades químicas. Ambos isótopos pueden reaccionar químicamente con oxígeno para formar dióxido de carbono, que absorben las plantas. Esto significa que todas las plantas contienen una pequeña cantidad de carbono-14 radiactivo. Todos los animales comen plantas (u otros animales que comen plantas) y, por tanto, tienen en ellos un poco de carbono-14. En resumen: todas las cosas vivas sobre la Tierra contienen algo de carbono-14.

El carbono-14 es un emisor beta y decae de vuelta a nitrógeno mediante la siguiente reacción:




$$^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{0}_{-1}e$$

Puesto que las plantas siguen absorbiendo dióxido de carbono en tanto estén vivas, cualquier pérdida de carbono-14 por decaimiento se rellena de inmediato con carbono-14 fresco proveniente de la atmósfera. De esta forma, se alcanza un equilibrio radiactivo donde existe una razón constante de alrededor de un átomo de carbono-14 por cada billón de átomos de carbono-12. Cuando una planta muere, el reabastecimiento de carbono-14 se detiene. Entonces el porcentaje de carbono-14 disminuye a una tasa constante determinada por su vida media.[7] En consecuencia, cuanto más tiempo lleve muerta una planta u otro organismo, menor carbono-14 contendrá en comparación con la cantidad constante de carbono-12.

La vida media del carbono-14 es de aproximadamente 5,730 años. Esto significa que la mitad de los átomos de carbono-14 que ahora están presentes en una planta o animal que muera hoy decaerá en los próximos 5,730 años. La mitad de los átomos restantes de carbono-14 decaerán en los siguientes 5,730 años, y así sucesivamente.

**FIGURA 33.23**
La cantidad de carbono-14 radiactivo del esqueleto disminuye a la mitad cada 5,730 años, con el resultado de que hoy el esqueleto contiene sólo una fracción del carbono-14 que tenía originalmente. Las flechas rojas simbolizan las cantidades relativas de carbono-14.

[7]Una muestra de 1 g de carbono contemporáneo contiene más o menos $5 \times 10^{22}$ átomos, de los cuales $6.5 \times 10^{10}$ son átomos de C-14, y tienen una tasa de desintegración beta de aproximadamente 13.5 decaimientos por minuto.

## IRRADIACIÓN DE ALIMENTOS

Cada semana en Estados Unidos, unas 100 personas, la mayoría de ellas niños o ancianos, mueren por enfermedades que contraen de los alimentos. Las personas que padecen cada semana enfermedades transmitidas por los alimentos representan millones, de acuerdo con los Centers for Disease Control and Prevention en Atlanta, Georgia. Pero los astronautas nunca. ¿Por qué? Porque la diarrea en órbita jamás sucede, y los alimentos ingeridos en las misiones espaciales se irradian con rayos gamma de alta energía proveniente de una fuente de cobalto radiactivo (Co-60). Los astronautas, así como los pacientes en muchos hospitales y asilos, no tienen que luchar contra la salmonela, *E. Coli*, microbios o parásitos en los alimentos irradiados con Co-60. Entonces, ¿por qué no hay más comida irradiada en el mercado? La respuesta es el temor público a la palabra *radiación*.

La irradiación de alimentos mata insectos en los granos, harina, frutas y verduras. Pequeñas dosis evitan que las papas, las cebollas y los ajos almacenados se echen a perder y aumenta de manera significativa la vida en anaqueles de los frutos rojos, como las fresas. Dosis más altas matan microbios, insectos y parásitos en las especias, el puerco y el pollo. La irradiación puede penetrar a través de latas y paquetes sellados. Lo que la irradiación *no* hace es dejar radiactivo el alimento irradiado. Ningún material radiactivo toca al alimento. Los rayos gamma atraviesan el alimento como la luz pasa a través del vidrio, y destruye la mayor parte de las bacterias que pueden provocar enfermedades. Ningún alimento se vuelve radiactivo porque los rayos gamma carecen de la energía necesaria para desprender neutrones de los núcleos atómicos.

Sin embargo, la irradiación sí deja trazas de compuestos rotos, idénticos a los que resultan de la pirólisis de los alimentos a la parrilla que ya ingieres. Comparado con el enlatado y el almacenamiento en frío, la irradiación tiene pocos efectos sobre la nutrición y el sabor. Estuvo presente durante la mayor parte del siglo XX y se ha puesto a prueba durante más de 50 años, sin evidencia de peligro para los consumidores. La irradiación de alimentos es respaldada por todas las principales sociedades científicas, la Organización Mundial de la Salud de las Naciones Unidas, la FDA de Estados Unidos y la American Medical Association. La irradiación es el método de elección en 37 países, como Bélgica, Francia y los Países Bajos. Pero su uso en Estados Unidos en la actualidad es bajo, pues la controversia continúa.

Esta controversia es otro ejemplo de la evaluación y la administración de riesgos. ¿Acaso los riesgos de lesión o muerte por los alimentos irradiados no deben ser juzgados de un modo racional y ponderados contra los beneficios que proporcionaría? ¿Acaso la decisión no debe basarse en el número de personas que *pueden* morir por alimentos irradiados frente a quienes *de hecho* mueren porque el alimento no se irradió?

Tal vez lo que se necesite sea un cambio de nombre: eliminar la palabra *radiación*, como se hizo con la palabra *nuclear* cuando el procedimiento médico al que se oponían y que una vez se conoció como NMRI (resonancia magnética nuclear) recibió el nombre más aceptable de MRI (resonancia magnética).

SCREENCAST: Datación con carbono

VIDEO: Datación con carbono

Con este conocimiento, los científicos pueden calcular la edad de los artefactos que contienen carbono, como herramientas de madera o esqueletos, al medir su nivel actual de radiactividad. Este proceso, conocido como **datación con carbono**, permite sondear hasta 50,000 años en el pasado. Después de ese tiempo, hay poco carbono-14 restante que permita análisis exactos.

La datación con carbono-14 sería un método de datación relativamente sencillo y exacto si la cantidad de carbono radiactivo en la atmósfera hubiera sido constante en el transcurso de las eras. Pero no ha sido así. Las fluctuaciones en el campo magnético del Sol, así como los cambios en la intensidad del campo magnético de la Tierra afectan las intensidades de los rayos cósmicos en la atmósfera de la Tierra, lo cual a su vez produce fluctuaciones en la producción de C-14. Además, los cambios de clima de la Tierra afectan la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera. Los océanos son grandes depósitos de dióxido de carbono. Cuando los océanos son fríos, liberan menos dióxido de carbono en la atmósfera que cuando están calientes.

### PUNTO DE CONTROL

**Supón que un arqueólogo extrae un gramo de carbono de una antigua hacha de mano y descubre que tiene un cuarto de la radiactividad que tiene un gramo del carbono extraído de una rama de árbol recién cortada. ¿Aproximadamente cuán antigua es el hacha?**

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

Si supones que la razón de C-14/C-12 era la misma cuando se fabricó el hacha, el mango del hacha tiene una antigüedad de dos vidas medias de C-14, o unos 11,500 años.

La datación de cosas antiguas, pero no la de seres vivos, se logra con minerales radiactivos, como el uranio. Los isótopos U-238 y U-235 que ocurren de manera natural decaen con mucha lentitud y al final se convierten en isótopos de plomo, pero no el isótopo de plomo común Pb-208. Por ejemplo, el U-238 decae en varias etapas hasta finalmente convertirse en Pb-206, mientras que el U-235 al final se convierte en el isótopo Pb-207. Los isótopos de plomo 206 y 207 que ahora existen, en algún momento fueron uranio. Cuanto más antigua sea la roca que tiene uranio, mayor es el porcentaje de estos isótopos restantes. A partir de las vidas medias de los isótopos de uranio, y del porcentaje de isótopos de plomo en la roca que tiene uranio, es posible calcular la fecha cuando se formó la roca.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Rayo X.** Radiación electromagnética con frecuencias más altas que el ultravioleta; emitidas por transiciones electrónicas a los estados energéticos más bajos en los átomos.

**Radiactividad.** Emisión espontánea de partículas energéticas por un núcleo atómico.

**Rayo alfa.** Chorro de partículas alfa (núcleos de helio) expulsados por determinados elementos radiactivos.

**Rayo beta.** Chorro de electrones (o positrones) emitidos durante el decaimiento radiactivo de ciertos núcleos.

**Rayo gamma.** Radiación electromagnética de frecuencia alta emitida por los núcleos de los átomos radiactivos.

**rad.** Acrónimo en inglés de "dosis de radiación absorbida" que denota una unidad de energía absorbida. Un rad es igual a 0.01 J de energía absorbida por kilogramo de tejido.

**rem.** Acrónimo en inglés de "roentgen equivalente en humano" que denota una unidad usada para medir el efecto de la radiación ionizante en los seres humanos.

**Nucleón.** Protón o neutrón nuclear; nombre colectivo para cualquiera de ellos o ambos.

**Quarks.** Las partículas elementales constituyentes o bloques constructores de la materia nuclear.

**Fuerza fuerte.** La fuerza que atrae a los nucleones entre sí dentro del núcleo atómico; una fuerza que es muy intensa a distancias cercanas y se debilita mucho con la distancia.

**Vida media.** Tiempo necesario para que decaiga la mitad de los átomos en una muestra de un isótopo radiactivo.

**Transmutación.** Conversión de un núcleo atómico de un elemento en un núcleo atómico de otro elemento a través de una pérdida o ganancia en el número de protones.

**Datación con carbono.** El proceso de determinar el tiempo transcurrido desde la muerte al medir la radiactividad del carbono de una muestra debida al carbono-14 que contiene.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 33.1 Los rayos X y la radiactividad

1. ¿Qué descubrió Roentgen acerca de un haz de rayos catódicos que golpeaban una superficie de vidrio?
2. ¿Qué tipo de rayos son los rayos X?
3. ¿Qué descubrió Becquerel acerca del uranio?
4. ¿Cuáles dos elementos descubrieron Pierre y Marie Curie?

### 33.2 Rayos alfa, beta y gamma

5. ¿Por qué los rayos gamma no se desvían en un campo magnético?
6. ¿Cuál tiene frecuencia más alta: los rayos X o los rayos gamma?

### 33.3 Radiación ambiental

7. Distingue entre un rad y un rem.
8. ¿Los seres humanos reciben más radiación de fuentes de radiación artificiales o naturales?
9. ¿El cuerpo humano es radiactivo? Explica.
10. ¿Qué es un trazador radiactivo?

### 33.4 El núcleo atómico y la fuerza fuerte

11. Menciona los dos nucleones diferentes.
12. ¿Por qué la fuerza eléctrica de repulsión de los protones en el núcleo atómico no hace que los protones salgan disparados?
13. ¿Por qué un núcleo más grande por lo general es menos estable que un núcleo más pequeño?
14. ¿Cuál es la función de los neutrones en el núcleo atómico?
15. ¿Cuál contiene el mayor porcentaje de neutrones: los núcleos grandes o los núcleos pequeños?

### 33.5 Vida media radiactiva

16. En general, ¿cómo se compara la tasa de decaimiento de un material con vida media larga, con la tasa de decaimiento de un material con vida media corta?
17. ¿Cuál es la vida media del Ra-226?

### 33.6 Detectores de radiación

18. ¿Qué tipo de rastro queda cuando una partícula energética se dispara a través de la materia?

19. ¿Cuál tipo de detector percibe la radiación mediante la ionización de gas en un tubo?
20. ¿Cuál tipo de detector percibe los destellos de luz producidos por partículas cargadas o rayos gamma?

### 33.7 Transmutación de elementos

21. ¿Qué es una transmutación?
22. Cuando el torio (número atómico 90) decae mediante emisión de una partícula alfa, ¿cuál es el número atómico del núcleo resultante?
23. Cuando el torio decae mediante la emisión de una partícula beta, ¿cuál es el número atómico del núcleo resultante?
24. ¿Cuál es el cambio en el número de masa atómica para cada una de las reacciones en las dos preguntas anteriores?
25. ¿Qué cambio en el número atómico ocurre cuando un núcleo emite una partícula alfa? ¿Una partícula beta? ¿Un rayo gamma?
26. ¿Cuál es el destino en el largo plazo de todo el uranio que existe en el mundo?
27. ¿Cuándo ocurrió la primera transmutación intencional exitosa de un elemento, y quién la llevó a cabo?

### 33.8 Datación radiométrica

28. ¿Qué ocurre cuando un núcleo de nitrógeno captura un neutrón adicional?
29. ¿Cuál es más predominante en los alimentos que comes: el carbono-12 o el carbono-14?
30. ¿Por qué el plomo se encuentra en todos los depósitos de uranio?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

31. Escribe una carta a uno de tus parientes favoritos que le ayude a disipar cualquier noción que pueda tener respecto de que la radiactividad es algo nuevo en el mundo. Haz un breve análisis de la función de la radiactividad en la datación de objetos antiguos. También explica cómo la radiactividad es una fuente principal del calor natural en el interior de la Tierra, y cita su importancia en los manantiales térmicos y volcanes.

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

32. Si una muestra de un isótopo radiactivo tiene una vida media de 1 año, ¿cuánto de la muestra original quedará al final del segundo año? ¿Al final del tercer año? ¿Al final del cuarto año?
33. Una muestra de un radioisótopo particular se coloca cerca de un contador Geiger, y se observa que registra 160 conteos por minuto. Ocho horas después, el detector cuenta a una tasa de 10 conteos por minuto. ¿Cuál es la vida media del material?
34. El isótopo cesio-137, que tiene una vida media de 30 años, es un producto de las plantas de energía nuclear. Demuestra que transcurrirán 120 años para que este isótopo decaiga a cerca de un dieciseisavo de su cantidad original.
35. A las 6:00 am, un hospital usa su ciclotrón para producir 1 miligramo del isótopo flúor-18 para utilizarlo como herramienta diagnóstica con su escáner PET. La vida media del F-18 es de 1.8 horas. ¿Cuánto F-18 queda a las 3:00 pm? ¿A medianoche? ¿El hospital debe planear producir más F-18 la mañana siguiente?
36. Supón que la intensidad de la radiación de carbono-14 en un antiguo pedazo de madera se registra en 6% de lo que sería en uno recién cortado de madera. Demuestra que este artefacto tiene 23,000 años de antigüedad.
37. Supón que quieres saber cuánta gasolina hay en un tanque de almacenamiento subterráneo. Viertes 1 galón de gasolina que contiene cierto material radiactivo con una vida media larga que produce 5,000 conteos por minuto. Al día siguiente, retiras un galón del tanque subterráneo y mides su radiactividad en 10 conteos por minuto. ¿Cuánta gasolina hay en el tanque?

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

38. Clasifica estos tres tipos de radiación por su capacidad para penetrar esta página de tu libro, de mayor penetración a menor:
    a. Partícula alfa.
    b. Partícula beta.
    c. Rayo gamma.
39. Considera estos tres núcleos: A. Th-233; B. U-235; C. U-238. De mayor a menor, clasifícalos por el número de
    a. protones en el núcleo.
    b. neutrones en el núcleo.
    c. electrones que suelen rodear al núcleo.
40. Considera las siguientes reacciones: A. Uranio-238 emite una partícula alfa; B. Plutonio-239 emite una partícula alfa; C. Torio-239 emite una partícula beta.
    a. Clasifica el núcleo resultante por su número atómico, del más alto al más bajo.
    b. Clasifica el núcleo resultante por el número de neutrones, de más a menos.

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

41. En el siglo XIX, el famoso físico lord Kelvin estimó que la edad de la Tierra era mucho menor de la que se calcula en la actualidad. ¿Qué información, que Kelvin no tuvo, le habría impedido cometer este error en la estimación?
42. ¿A cuál de los siguientes son más similares los rayos X: rayos alfa, beta o gamma?
43. La radiación gamma es fundamentalmente diferente a las radiaciones alfa y beta. ¿Cuál es esta diferencia básica?
44. ¿Por qué una muestra de material radiactivo siempre está un poco más caliente que sus alrededores?
45. Algunas personas dicen que todas las cosas son posibles. ¿Es posible que un núcleo de hidrógeno común emita una partícula alfa? Defiende tu respuesta.
46. ¿Por qué los rayos alfa y beta se desvían en direcciones opuestas en un campo magnético? ¿Por qué los rayos gamma no se desvían?
47. La partícula alfa tiene el doble de carga eléctrica que la partícula beta pero, para la misma energía cinética, se desvía menos que la beta en un campo magnético. ¿Por qué esto es así?
48. ¿Cómo se comparan las trayectorias de los rayos alfa, beta y gamma en un campo eléctrico?
49. ¿Cuál tipo de radiación (alfa, beta o gamma) produce un mayor cambio en el *número de masa* cuando es emitida por un núcleo atómico? ¿Cuál produce el mayor cambio en *número atómico*?
50. ¿Cuál tipo de radiación (alfa, beta o gamma) produce menos cambio en el número de masa? ¿En el número atómico?
51. ¿Cuál tipo de radiación (alfa, beta o gamma) predomina dentro de un elevador cerrado que desciende a una mina de uranio?
52. Al bombardear núcleos atómicos con "balas" de protones, ¿por qué los protones deben acelerar hasta altas energías si van a hacer contacto con los núcleos blanco?
53. Justo después de que una partícula alfa abandona el núcleo, ¿esperarías que acelere? Defiende tu respuesta.
54. ¿Qué tienen en común todos los isótopos del mismo elemento? ¿Cómo difieren?
55. ¿Por qué esperarías que las partículas alfa, con su mayor carga, sean menos capaces de penetrar en los materiales que las partículas beta con la misma energía?
56. Dos protones en un núcleo atómico se repelen mutuamente, pero también se atraen entre sí. Explica.
57. ¿Cuál interacción tiende a mantener unidas a las partículas en un núcleo atómico y cuál interacción tiende a separarlas?
58. ¿Qué evidencia apoya la afirmación de que la interacción nuclear fuerte puede dominar sobre la interacción eléctrica a distancias cortas en el interior del núcleo?
59. ¿Puede enunciarse con certeza que, siempre que un núcleo emite una partícula alfa o una beta, necesariamente se convierte en el núcleo de otro elemento?
60. ¿Exactamente qué es un átomo de hidrógeno con carga positiva?
61. ¿Por qué diferentes isótopos del mismo elemento tienen las mismas propiedades químicas?
62. La radiación proveniente de una fuente puntual obedece la ley del inverso al cuadrado. Si un contador Geiger a 1 m de una muestra pequeña registra 360 conteos por minuto, ¿cuál será su tasa de conteo a 2 m de la fuente? ¿Cuál será a 3 m de la fuente?
63. ¿Por qué las partículas cargadas que vuelan a través de una cámara de burbujas viajan en trayectorias espirales en lugar de hacerlo en trayectorias circulares o elípticas que idealmente pueden seguir?
64. ¿Cuáles dos cantidades siempre se conservan en todas las ecuaciones nucleares?
65. Si un átomo tiene 100 electrones, 157 neutrones y 100 protones, ¿cuál es su masa atómica aproximada? ¿Cuál es el nombre de este elemento?
66. Cuando un núcleo de $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ decae mediante la emisión de una partícula alfa, ¿cuál es el número atómico del núcleo resultante?
67. Cuando un núcleo de $^{218}_{84}\mathrm{Po}$ emite una partícula beta, se transforma en el núcleo de un elemento diferente. ¿Cuáles son el número atómico y el número de masa atómica de este elemento "hijo"?
68. Cuando un núcleo de $^{218}_{84}\mathrm{Po}$ emite una partícula alfa, ¿cuáles son el número atómico y el número de masa atómica del elemento resultante?
69. ¿Cuál tiene mayor número de protones: U-235 o U-238? ¿Cuál tiene mayor número de neutrones?
70. Menciona el número de neutrones y protones en cada uno de estos núcleos: $^{2}_{1}\mathrm{H}$, $^{12}_{6}\mathrm{C}$, $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$, $^{197}_{79}\mathrm{Au}$, $^{90}_{38}\mathrm{Sr}$ y $^{238}_{92}\mathrm{U}$.
71. ¿Cómo es posible que un elemento decaiga "hacia adelante en la tabla periódica"; esto es: que decaiga en un elemento con un número atómico más alto?
72. ¿Cómo podría un elemento emitir partículas alfa y beta y resultar en el mismo elemento?
73. Cuando el fósforo (P) radiactivo decae, emite un positrón. ¿El núcleo resultante será otro isótopo de fósforo? Si no, ¿qué será?
74. "El estroncio-90 es una fuente de betas pura." ¿Cómo es que un físico podría poner a prueba esta afirmación?
75. Un amigo sugiere que los núcleos están compuestos de igual número de protones y electrones, sin neutrones. ¿Qué evidencia puedes citar para demostrar que tu amigo está equivocado?
76. El radio-226 es un isótopo común en la Tierra, pero tiene una vida media de alrededor de 1,600 años. Dado que la Tierra tiene unos 5 mil millones de antigüedad, ¿por qué todavía queda radio?
77. Tu amigo dice que el helio que se utiliza para inflar globos es un producto del decaimiento radiactivo. Otro amigo discrepa. ¿Con quién estás de acuerdo?
78. Otro amigo, temeroso de vivir cerca de una planta de fisión, quiere alejarse de la radiación y viajar a las montañas altas para dormir por la noche sobre afloramientos de granito. Comenta acerca de esto.

79. Otra de tus amigas viajó a las faldas de la montaña para escapar de los efectos de la radiactividad. Mientras se baña en la calidez de un manantial térmico, pregunta en voz alta cómo se mantienen calientes los manantiales. ¿Qué le dirías?
80. Un amigo fabrica un contador Geiger para comprobar la radiación del ambiente normal de la localidad. El contador suena al azar pero de manera repetida. Otro amigo, cuya tendencia es temerle más a lo que entiende menos, hace un esfuerzo por evitar los contadores Geiger y te mira en busca de consejo. ¿Qué le dirías?
81. ¿Por qué la datación con carbono no es efectiva para determinar las edades de los huesos de los dinosaurios?
82. ¿La datación con carbono es adecuada para medir la edad de los materiales que tienen pocos años de antigüedad? ¿Algunos miles de años? ¿Algunos millones de años?
83. La edad de los manuscritos del Mar Muerto se descubrió gracias a la datación con carbono. ¿Esta técnica podría aplicarse si estuvieran grabados en tablillas de piedra? Explica.
84. Elabora dos preguntas de opción múltiple para comprobar que un compañero de clase entiende lo que es la datación radiactiva.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

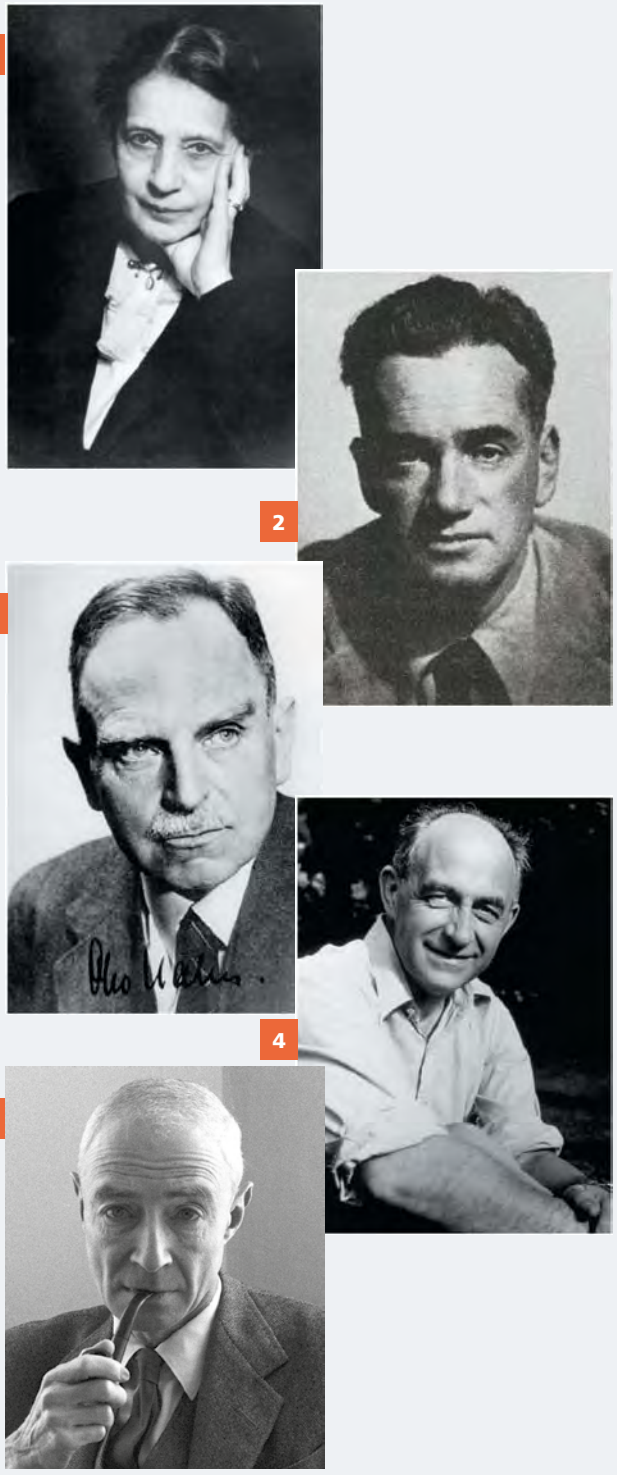
85. Si haces un conteo de 1,000 personas nacidas en el año 2000 y descubres que la mitad de ellas todavía viven en 2060, ¿esto significa que un cuarto de ellas estará viva en 2120 y un octavo de ellas vivirá en 2180? ¿Cuál es la diferencia entre las tasas de mortalidad de las personas y las "tasas de mortalidad" de los átomos radiactivos?
86. A juzgar por la Figura 33.22, ¿cuántas partículas alfa y beta se emiten en las series de eventos de decaimiento radiactivo de un núcleo de U-238 a un núcleo de Pb-206? ¿Tiene importancia cuál ruta se siga?
87. Los elementos por arriba del uranio en la tabla periódica no existen en cantidades considerables en la naturaleza porque tienen vidas medias cortas. Sin embargo, hay varios elementos por abajo del número atómico del uranio con vidas medias igualmente cortas que sí existen en cantidades considerables en la naturaleza. ¿Cómo puedes explicar esto?
88. Aunque el carbón contiene sólo cantidades mínimas de materiales radiactivos, hay más radiación emitida por una planta eléctrica que quema carbón que por una planta de fisión, simplemente por la gran cantidad de carbón que se quema en las plantas. ¿Qué indica esto acerca de los métodos para prevenir la liberación de radiactividad que suelen aplicarse en los dos tipos de plantas eléctricas?
89. Cuando los alimentos se irradian con rayos gamma provenientes de una fuente de cobalto-60, ¿los alimentos se vuelven radiactivos? Defiende tu respuesta.
90. Cuando el autor asistió al bachillerato, hace ya unos 60 años, su profesor le mostró una pieza de uranio y midió su radiactividad con un contador Geiger. ¿La lectura de la misma pieza sería diferente el día de hoy?

34

CAPÍTULO 34

# Fisión y fusión nucleares


34.1 Fisión nuclear
34.2 Reactores de fisión nuclear
34.3 El reactor reproductor
34.4 Energía eléctrica mediante fisión
34.5 Equivalencia masa-energía
34.6 Fusión nuclear
34.7 Cómo controlar la fusión

1 Lise Meitner, la descubridora de la fisión nuclear; 2 Otto Frisch, su sobrino físico quien le ayudó en su descubrimiento, y 3 Otto Hahn, quien se adjudicó el crédito de ello. 4 El físico italiano Enrico Fermi recibió el Premio Nobel en 1938 por el trabajo que condujo a la fisión nuclear. Cuando abandonó Estocolmo, después de recibir el premio para regresar a su nativa Italia, dijo jocosamente que se había perdido y había terminado en Nueva York. De hecho, él y su esposa judía, Laura, planearon precavidamente su escape de la Italia fascista. Cuatro años después, en Chicago, Fermi fue el primero en iniciar la fisión controlada, y obtuvo la ciudadanía estadounidense en 1945. 5 Robert J. Oppenheimer dirigió el laboratorio de Los Álamos para el Proyecto Manhattan durante la Segunda Guerra Mundial. Fue considerado un héroe nacional y fue ampliamente respetado incluso después de quedar profesional y personalmente devastado por la cacería de brujas política de la década de 1950.

Lise Meitner nació en 1878, en Viena. Las niñas de aquella época no iban a la escuela pública después de comenzada la adolescencia. Lise recibió su "certificado de conclusión" escolar cuando apenas tenía 13 años de edad. Debido a que sus padres no tenían los recursos económicos para enviarla a Suiza a un internado privado, se inscribió en una "escuela para jovencitas" a fin de prepararse como profesora de francés. Pero su corazón estaba en las matemáticas y la física, no en el francés. A los 19 años de edad se unió a un grupo de otras jóvenes ambiciosas que estudiaban por cuenta propia —con la ayuda de sus tutores privados— para prepararse para la universidad. Después de apenas dos años de trabajo intenso, aprobó el examen de admisión a la Universidad de Viena (1 de sólo 4 de las 14 mujeres que lo intentaron ese año), y en 1906, a los 27 años de edad, obtuvo un doctorado con los más altos honores.

Con el estímulo y apoyo financiero de su padre, Meitner fue a Berlín para impulsar su carrera. Max Planck se alejó de su política de no dejar que las mujeres asistieran a sus conferencias y le permitió entrar a su clase. Después de un año se convirtió en su ayudante. Luego se unió al químico Otto Hahn en lo que sería una fructífera colaboración de 30 años. Ambos, pronto descubrieron varios isótopos nuevos, y en 1909 Meitner publicó dos artículos sobre la radiación beta.

Durante la Primera Guerra Mundial, tanto ella como Hahn se tomaron un tiempo para dedicarse a labores de guerra —ella trabajó como enfermera y técnico de rayos X— pero también encontraron tiempo para continuar con sus investigaciones, y en 1918 descubrieron el elemento número 91, el protactinio. En la década de 1920, ella se convirtió en la primera mujer en Berlín, tal vez la primera en toda Alemania, en ser nombrada profesora. Pronto su trabajo sobre la radiactividad le ganó el reconocimiento de la comunidad científica mundial.

Cuando Adolf Hitler llegó al poder en 1933, Meitner, aunque de origen judío, pudo continuar con su trabajo, al menos durante un tiempo, protegida por su ciudadanía austriaca. Casi todos los demás científicos judíos, incluido su sobrino Otto Frisch, fueron despedidos o forzados a renunciar a sus puestos, y la mayoría de ellos, incluido Albert Einstein, emigraron de Alemania.

En 1934 llegaron noticias del trabajo de Enrico Fermi y sus colegas en Roma, en el cual habían bombardeado muchos elementos, incluido el uranio, con neutrones, y al parecer habían creado nuevos elementos. Meitner y Hahn se unieron a la búsqueda internacional de "transuránicos", elementos más pesados que el uranio —una búsqueda que inesperadamente condujo a la fisión nuclear—.

En julio de 1938, cuando Meitner era amenazada con su despido, gracias a la ayuda de físicos holandeses escapó a Holanda. Después de escapar por un pelo de los oficiales de inmigración alemanes, llegó a salvo, pero sin sus pertenencias. Había salido rápidamente de Alemania, con sólo 10 marcos en la bolsa y un anillo que Otto Hahn le había dado, herencia de su madre, para sobornar a los guardias fronterizos si era necesario. Después, Meitner se mudó a Estocolmo, donde ocupó un puesto vacante y estableció una relación laboral con Niels Bohr, quien viajaba de manera periódica entre Copenhague y Estocolmo. Siguió colaborando con Hahn y otros científicos alemanes.

En el otoño de 1938, Hahn y Meitner se reunieron clandestinamente en Copenhague para planear una nueva ronda de experimentos con uranio. En diciembre de ese año, Hahn escribió a Meitner que él y su colega Fritz Strassmann habían descubierto el elemento bario en muestras de uranio puro que fueron bombardeadas con neutrones. Ellos eran buenos químicos y estaban seguros de su resultado, pero tenían dificultades para explicar la apariencia del bario. Durante las fiestas navideñas, Meitner y su sobrino que estaba de visita, Otto Frisch, en un paseo por los bosques nevados de Suecia se toparon con una explicación: el núcleo del uranio se rompió en núcleos más ligeros, que incluían núcleos de bario. Frisch se apresuró a regresar a Copenhague y realizó un experimento que confirmó sus hipótesis del rompimiento nuclear. Utilizando un término prestado de la biología, lo llamaron *fisión*.[1] Cuando Niels Bohr se embarcó con destino a Estados Unidos el 7 de enero, llevó consigo las noticias de la fisión. (La posibilidad de la fisión nuclear en realidad la había sugerido 5 años antes el científico alemán Ida Noddack, basado en indicios de la obra de Fermi, pero nadie en la época tomó en serio su propuesta.)

Meitner y Frisch se dieron cuenta de que, con base en las masas conocidas de los núcleos, y la famosa ecuación de Einstein, $E = mc^2$, el proceso de fisión podía liberar mucha energía. Esta liberación de energía es lo que permitió a Frisch, y después a otros científicos, verificar con rapidez la realidad de la fisión en el laboratorio.

En una carta a Hahn, Meitner explicó la nueva idea. Pero, por razones políticas, era imposible que la exiliada Meitner publicara de manera conjunta con Hahn en 1939. De modo que fueron Hahn y Strassmann quienes publicaron el ahora histórico artículo que informaba sobre la producción de bario cuando el uranio se bombardeaba con neutrones. Y fue sólo Hahn quien, en 1944, recibió el Premio Nobel de Química por el descubrimiento de la fisión nuclear. En ninguna parte de su discurso de aceptación en 1946 mencionó el papel de Meitner y Frisch. Fue el único "protagonista" del prestigioso premio.

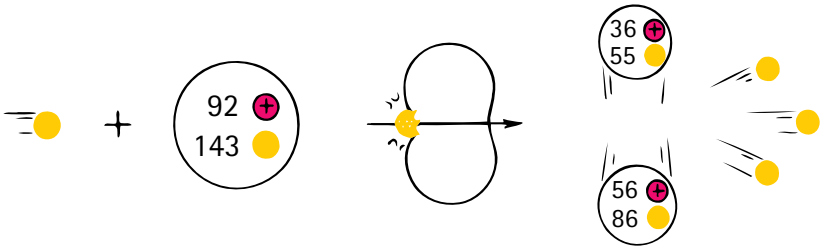
Los científicos de todo el mundo se dieron cuenta, casi al mismo tiempo, de que la fisión nuclear tenía el potencial de impulsar un arma. Los científicos que emigraron a Estados Unidos se pusieron en acción y urgieron a Albert Einstein para que escribiera una carta de advertencia al presidente Roosevelt. Esto condujo al Proyecto Manhattan y la creación de la bomba atómica comenzó bajo la dirección de Robert J. Oppenheimer.

Después de que la guerra terminó, Meitner expresó su ira contra los científicos alemanes que ayudaron a Hitler (quien, por fortuna, no consiguió fabricar una bomba atómica). Ella se convirtió en ciudadana sueca en 1949, pero se mudó a Inglaterra en 1960 y murió en Cambridge en 1968, poco después de su cumpleaños 90. Su sobrino Otto redactó el epitafio de su lápida: "Lise Meitner: una física que nunca perdió su humanidad". Un homenaje más reciente lo constituye el nombre del elemento número 109: meitnerio.

[1]De manera similar, Ernest Rutherford usó un término biológico cuando eligió la palabra *núcleo* para el centro de un átomo.

## 34.1 Fisión nuclear

La **fisión nuclear** implica un delicado equilibrio en el interior del núcleo, entre la atracción nuclear y la repulsión eléctrica entre protones. En todos los núcleos de los elementos que se encuentran en la naturaleza, las fuerzas nucleares dominan. Sin embargo, en el uranio, este dominio es tenue. Si el núcleo de uranio se estira en una forma alargada (Figura 34.1), las fuerzas eléctricas pueden empujarlo hacia una forma incluso más alargada. Si la elongación rebasa un punto crítico, las fuerzas nucleares ceden el paso a las eléctricas y el núcleo se separa. Esto es fisión.[2] La absorción de un neutrón por un núcleo de uranio que suministra suficiente energía para ocasionar tal elongación. El proceso de fisión resultante puede producir muchas combinaciones diferentes de núcleos más pequeños. Un ejemplo típico es




$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{91}_{36}\mathrm{Kr} + {}^{142}_{56}\mathrm{Ba} + 3({}^{1}_{0}n) $$

En esta reacción, observa que un neutrón comienza la fisión del núcleo de uranio y que la fisión produce tres neutrones (amarillos).[3] En vista de que los neutrones no tienen carga y no son repelidos por los núcleos atómicos, constituyen buenas "balas nucleares" y pueden causar la fisión de más átomos de uranio, lo que libera todavía más neutrones, lo que puede producir todavía más fisiones y liberar una avalancha de todavía más neutrones. A tal secuencia se le llama **reacción en cadena**, una reacción autosustentable en la que los productos de un evento de reacción estimulan aún más eventos de reacción (Figura 34.2).

Una reacción de fisión típica libera energía de alrededor de 200,000,000 electrón-volts (eV).[4] (En comparación, la explosión de una molécula de TNT libera sólo 30 eV.) La masa combinada de los fragmentos de fisión y los neutrones producidos en la fisión es menos que la masa del núcleo de uranio original. La pequeña cantidad de masa perdida convertida en esta sorprendente cantidad de energía es acorde con la ecuación de Einstein, $E = mc^2$. La energía de fisión está principalmente en la forma de energía cinética de los fragmentos de fisión que se separan unos de otros y de los neutrones expulsados. Una cantidad más pequeña de energía está en la forma de radiación gamma.

El mundo científico fue sacudido por la noticia de la fisión nuclear, no sólo por la enorme liberación de energía, sino también por los neutrones adicionales que se liberaban en el proceso. Una reacción de fisión típica libera dos o tres neutrones. Estos nuevos neutrones, a su vez, pueden causar la fisión de otros dos o tres núcleos atómicos, lo que libera más energía y un total de cuatro a nueve neutrones más. Si cada uno de estos neutrones divide sólo un núcleo, el siguiente paso en la reacción producirá entre 8 y 27 neutrones, y así de manera sucesiva. En consecuencia, una reacción en cadena completa puede proseguir a una tasa exponencial.

¿Por qué las reacciones en cadena no se presentan en los depósitos de uranio que se encuentran en la naturaleza? Lo harían si todos los átomos de uranio se fisionaran con esa facilidad. La fisión ocurre principalmente por el raro isótopo U-235, que

[2]La fisión que resulta de la absorción de neutrones se llama *fisión inducida*. En muy pocos casos, sobre todo entre los transuránicos (elementos más pesados que el uranio), los núcleos también pueden experimentar *fisión espontánea* sin absorción inicial de neutrones.

[3]En esta reacción, tres neutrones se expulsan cuando ocurre la fisión. En algunas otras reacciones, pueden expulsarse dos neutrones, u, ocasionalmente, uno o cuatro. En promedio, la fisión de uranio produce 2.5 neutrones por reacción.

[4]El *electrón-volt* (eV) se define como la cantidad de energía cinética que adquiere un electrón al acelerar a través de una diferencia de potencial de 1 V.

**SCREENCAST: Fisión nuclear**

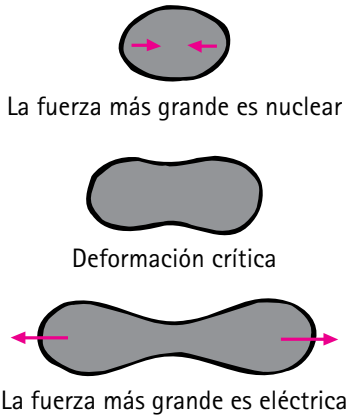



**FIGURA 34.1**
La deformación nuclear puede continuar hasta la fisión, cuando las fuerzas eléctricas de repulsión superan a las fuerzas nucleares de atracción.

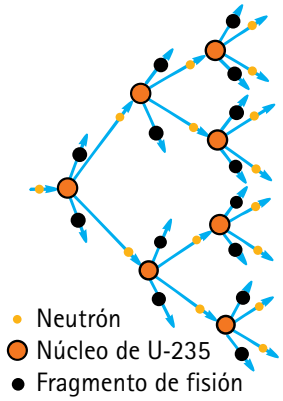



**FIGURA 34.2**
Una reacción en cadena.

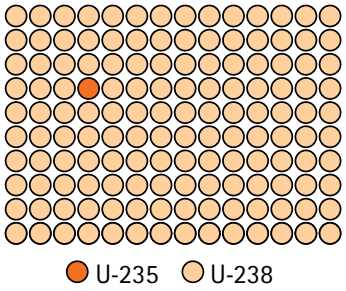



**FIGURA 34.3**
Sólo 1 parte en 140 (0.7%) del uranio presente en la naturaleza es U-235.

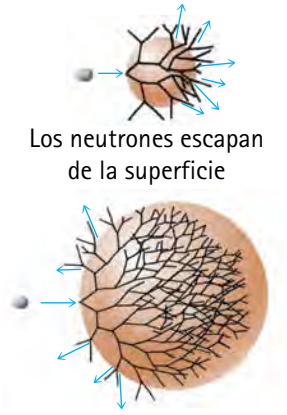



**FIGURA 34.4**
La reacción en cadena en una pieza pequeña de U-235 puro se extingue porque los neutrones se fugan de la superficie muy rápidamente. La pieza pequeña tiene un área superficial grande en relación con su masa. En una pieza más grande, más átomos de uranio y un área superficial más pequeña se presentan a los neutrones.

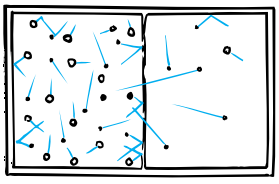


**FIGURA 34.6**
Las moléculas más ligeras se mueven más rápido que las más pesadas a la misma temperatura y se difunden con más facilidad a través de una delgada membrana.

constituye sólo 0.7% del uranio en las minas de uranio puro. Cuando el isótopo más abundante U-238 absorbe neutrones creados por la fisión del U-235, el U-238 por lo general no experimenta fisión. De modo que cualquier reacción en cadena es detenida por el U-238 que absorbe neutrones, así como por la roca en la que está incrustado el mineral. En el mundo actual, el uranio presente en la naturaleza es demasiado "impuro" para experimentar una reacción en cadena de manera espontánea.[5]

Si una reacción en cadena ocurriera en un pedazo de U-235 del tamaño de una pelota de béisbol, resultaría una enorme explosión. Sin embargo, si la reacción en cadena comenzara en un pedazo más pequeño de U-235 puro, no ocurriría ninguna explosión. Esto se debe a la geometría: la razón del área superficial con respecto a la masa es más alta en un pedazo pequeño que en uno grande (tal como hay más piel en seis papas pequeñas que tienen una masa combinada de 1 kg, que en una sola papa de 1 kg). De modo que hay más área superficial en un cúmulo de piezas pequeñas de uranio que en una pieza grande. En una pieza pequeña de U-235, por la superficie escapan tantos neutrones libres que la reacción en cadena se extingue. En una pieza más grande, una fracción más pequeña de neutrones libres escapa antes de desencadenar otra fisión, de modo que la reacción en cadena se acumula, lo que libera una gran cantidad de energía (Figura 34.4). Cuando las masas son mayores que una determinada cantidad, denominada **masa crítica**, puede ocurrir una explosión de enorme magnitud.

Considera una gran cantidad de U-235 dividida en dos piezas, cada una con una masa menor que la crítica. Las unidades son *subcríticas*. Los neutrones de cualquier pieza llegan con facilidad a una superficie y escapan antes de acumular una reacción en cadena mensurable. Pero si las piezas se juntan de manera súbita, el área superficial disminuye. Si la masa combinada es mayor que la crítica, llamada *supercrítica*, la reacción en cadena se acumula explosivamente. Esto es lo que puede ocurrir en una bomba de fisión nuclear (Figura 34.5). Una bomba en la que las piezas de uranio se juntan es la llamada arma "tipo cañón", en oposición a la ahora más común "arma de implosión".

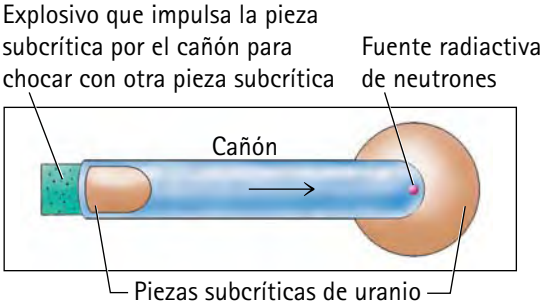



**FIGURA 34.5**
Diagrama simplificado de una bomba de fisión de uranio del "tipo cañón" idealizada.

Construir una bomba de fisión es una tarea colosal. La dificultad consiste en separar suficiente U-235 del más abundante U-238. Los científicos tardaron más de dos años en extraer suficiente U-235 de las menas de uranio para fabricar la bomba que se detonó en Hiroshima en 1945. En esta histórica explosión se usó un pedazo de U-235 probablemente un poco más grande que una pelota de softbol. A la fecha, la separación de isótopos de uranio sigue siendo un proceso difícil, aunque centrífugas avanzadas lo han hecho menos descomunal de lo que era durante la Segunda Guerra Mundial. Los científicos que trabajaron en el secreto Proyecto Manhattan de la época usaron dos métodos de separación de isótopos. En un método se empleó difusión, donde las moléculas de un compuesto gaseoso (hexafluoruro de uranio) que contiene el U-235 más ligero tienen una rapidez promedio un poco más alta que las moléculas que contienen U-238 a la misma temperatura. El isótopo más rápido tiene mayor tasa de difusión a través de una delgada membrana o pequeña abertura, lo que resulta en un gas un poco enriquecido que contiene U-235 en el otro lado (Figura 34.6). La difusión a través de miles de cámaras, al final produjo una muestra suficientemente enriquecida de U-235.

[5]Hace mucho tiempo en la historia de la Tierra, el porcentaje de U-235 en el uranio natural era más alto de lo que es hoy. El U-235 tiene una vida media más corta que el U-238, de modo que, con el tiempo, el porcentaje de U-235 disminuye. En 1972, el físico francés Francis Perrin, reunió evidencia de que, hace unos 1.7 mil millones de años, existieron reactores naturales en los depósitos de uranio en lo que ahora es Gabón, en África Occidental.

El otro método, usado sólo para un enriquecimiento parcial, empleó la separación magnética de iones de uranio disparados hacia un campo magnético. Los iones de U-235, con masa más pequeña, se desviaron más por el campo magnético que los iones de U-238 y se recolectaron átomo por átomo por una rendija colocada para capturarlos (revisa la Figura 34.14). Después de un par de años, los dos métodos produjeron algunas decenas de kilogramos de U-235.

La separación de isótopos de uranio en la actualidad se logra de un modo más fácil con una centrífuga de gas. El gas hexafluoruro de uranio se hace girar en un tambor a rapideces tremendamente altas (del orden de 1,500 km/h). Las moléculas de gas que contienen el U-238 más pesado gravitan hacia el exterior como la leche en un separador de lácteos, y el gas que contiene el U-235 más ligero se extrae del centro. Dificultades de ingeniería, superadas sólo en los años más recientes, impidieron el uso de este método durante el Proyecto Manhattan.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Una bola de 10 kg de U-235 es supercrítica, pero la misma bola dividida en pequeños pedazos no lo es. Explica.**
2. **¿Por qué las moléculas del gas hexafluoruro de uranio hechas con U-235 se mueven un poco más rápido a la misma temperatura que las moléculas del gas hexafluoruro de uranio hechas con U-238?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. Los pedazos pequeños tienen un área superficial combinada más grande que la bola de la cual provienen (tal como el área superficial combinada de la grava es más grande que el área superficial de una roca de la misma masa). Los neutrones escapan por la superficie antes de que una reacción en cadena sostenida pueda acumularse.
2. A la misma temperatura, las moléculas de ambos compuestos tienen la misma energía cinética (1/2 $mv^2$). Así que las moléculas hechas con el U-235 menos masivo deben tener una rapidez correspondientemente más alta.

## 34.2 Reactores de fisión nuclear

En general, una reacción en cadena no puede tener lugar en uranio natural *puro* porque es principalmente U-238. Los neutrones liberados por los átomos de U-235 al fisionarse son neutrones rápidos, capturados con facilidad por los átomos de U-238, que no se fisionan. Un hecho experimental crucial es que es mucho más probable que los neutrones *lentos* sean capturados por el U-235 que por el U-238.[6] Si los neutrones pueden frenarse, existe mayor posibilidad de que un neutrón liberado por fisión produzca una fisión en otro átomo de U-235, incluso en medio de los átomos de U-238, que son más abundantes y absorben neutrones. Este aumento puede ser suficiente para permitir que tenga lugar una reacción en cadena.

**FIGURA 34.7**
Representación artística de la configuración de la cancha de squash bajo las gradas del Stagg Field en la University of Chicago, donde Enrico Fermi y sus colegas construyeron el primer reactor nuclear.

Menos de un año después del descubrimiento de la fisión, los científicos se dieron cuenta de que una reacción en cadena con metal uranio ordinario podía ser posible si el uranio se descomponía en pequeños fragmentos y se separaba por medio de un material que frenara

[6]Esto es similar a la absorción selectiva de varias frecuencias de luz. Tal como los átomos de varios elementos absorben luz de manera diferente, varios isótopos del mismo elemento, aunque químicamente sean casi idénticos, pueden tener propiedades nucleares muy diferentes y absorber neutrones de manera distinta.

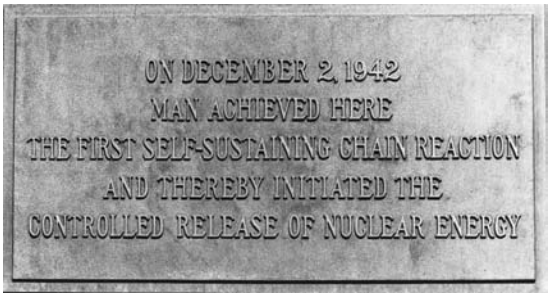



**FIGURA 34.8**
La placa de bronce en el Stagg Field de Chicago conmemora la histórica reacción en cadena de fisión de Enrico Fermi. En ella se lee: "El 2 de diciembre de 1942, el hombre logró aquí la primera reacción en cadena autosostenida, con lo cual inició la liberación controlada de energía nuclear".

los neutrones liberados por la fisión nuclear. Enrico Fermi, quien llegó a Estados Unidos procedente de Italia en diciembre de 1938, supervisó la construcción del primer reactor nuclear (o *pila atómica*, como se le llamó) en una cancha de *squash* bajo las gradas del Stagg Field en la University of Chicago. Él y su grupo usaron grafito, una forma común de carbono, para frenar los neutrones. El 2 de diciembre de 1942 lograron la primera liberación controlada autosostenida de energía nuclear.

Tres destinos son posibles para un neutrón en un metal de uranio ordinario. Puede (1) causar la fisión de un átomo de U-235, (2) escapar del metal hacia los alrededores no fisionables, o (3) ser absorbido por un U-238 sin causar fisión. Para hacer que el primer destino fuera más probable, se usó grafito. El uranio se dividió en paquetes separados y se enterró a intervalos regulares en casi 400 toneladas de grafito. Una analogía simple aclara la función del grafito: si una bola de golf rebota en una pared masiva, es difícil que pierda rapidez, pero si rebota de una pelota de béisbol, pierde mucha rapidez. El caso del neutrón es similar. Si un neutrón rebota en un núcleo pesado, difícilmente pierde rapidez, pero si rebota en un núcleo de carbono más ligero, pierde mucha rapidez. Se dice que el grafito "modera" los neutrones.[7] Todo el aparato se llama *reactor*.

Los reactores de fisión en la actualidad contienen cuatro componentes: combustible nuclear, barras de control, un moderador y un fluido (por lo general agua) para extraer el calor del reactor. El combustible nuclear es principalmente U-238 más cerca de 3 a 5% de U-235. Dado que el U-235 está tan altamente diluido con U-238, una explosión como la de una bomba nuclear no es posible.[8] La tasa de reacción, que depende del número de neutrones disponibles para iniciar la fisión de otros núcleos de U-235, por lo general se controla mediante barras insertadas en el reactor. Las barras de control están hechas de un material que absorbe neutrones, por lo general cadmio o boro. El agua que rodea al combustible nuclear con frecuencia funciona como moderador y como refrigerante. El agua se mantiene bajo alta presión para mantenerla a una temperatura alta sin hervir. Calentada por la fisión, esta agua entonces transfiere el calor a un segundo sistema de agua a menor presión, el cual pone en marcha una turbina y un generador eléctrico. Se utilizan dos sistemas de agua independientes para que no llegue absolutamente nada de radiactividad a la turbina.

**pti**

- Una gran abundancia de combustible nuclear para reactores de fisión estará disponible cuando se desmantelen los miles de armas nucleares fabricadas durante las décadas anteriores. Cuando el Pu-239 destinado a las bombas se mezcle con las toneladas del agotado U-238 actualmente en almacenamiento, los reactores podrán suministrar al mundo energía eléctrica limpia durante muchos años.

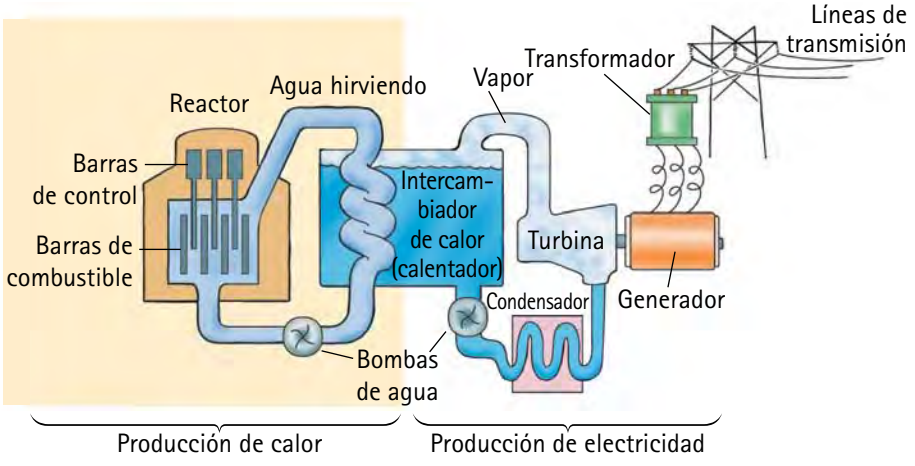



**FIGURA 34.9**
Diagrama de una planta de fisión nuclear.

[7]El *agua pesada*, que contiene el isótopo pesado del hidrógeno, deuterio, es un moderador incluso más eficiente. Esto se debe a que, en una colisión elástica, un neutrón transfiere mayor porción de su energía al núcleo de deuterio de la que transferiría al núcleo más pesado de carbono, y un deuterón nunca absorbe un neutrón, como ocasionalmente hace un núcleo de carbono.

[8]Sin embargo, en el peor de los accidentes, es posible que el calor sea suficiente para fundir el núcleo del reactor, y, si el edificio del reactor no es lo suficientemente resistente, la radiactividad escapará al ambiente. Uno de tales accidentes ocurrió en el reactor de Chernobyl en 1986, en Ucrania, que entonces era una república constitutiva de la Unión Soviética. Otro desastre nuclear fue resultado del tsunami de 2012 en Fukushima, Japón.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Cuál es la función de un moderador en un reactor nuclear? ¿De las barras de control?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

Un moderador frena los neutrones que normalmente son demasiado rápidos para ser absorbidos con facilidad por los isótopos fisionables, como el U-235. Las barras de control absorben más neutrones cuando son empujados hacia el reactor y menos neutrones cuando son jalados afuera del reactor. Por tanto, controlan el número de neutrones que participan en la reacción en cadena.

## PLUTONIO

A principios del siglo XIX, el planeta más lejano conocido en el sistema solar era Urano. Al primer planeta en ser descubierto más lejos de Urano se le llamó Neptuno. En 1930 se descubrió lo que pareció ser un planeta más lejano que Neptuno y se le nombró Plutón. Durante esta época el elemento más pesado conocido era el uranio, llamado así por Urano unos años después del descubrimiento del planeta. Como correspondía, al primer elemento transuránico descubierto se le llamó *neptunio* y al segundo elemento transuránico se le nombró *plutonio*.

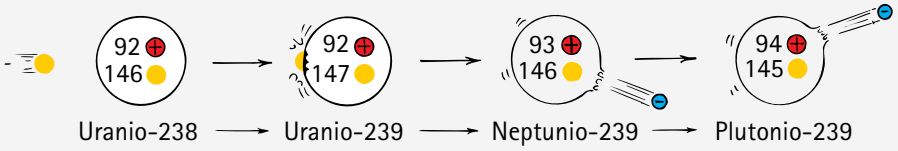
El neptunio se produce cuando un núcleo de U-238 absorbe un neutrón. En lugar de experimentar fisión, el núcleo emite una partícula beta y se convierte en neptunio-239, un isótopo del siguiente elemento en la tabla periódica. Su vida media es de sólo 2.4 días, de modo que no anda por aquí mucho tiempo. El neptunio-239 es un emisor beta y muy pronto se convierte en plutonio-239, cuya vida media es de alrededor de 24,000 años. Dura un tiempo considerable. El isótopo plutonio-239, al igual que el U-235, experimenta fisión cuando captura un neutrón. Mientras que la separación de U-235 fisionable del metal uranio es un proceso muy difícil (porque el U-235 y el U-238 tienen las mismas características químicas), la separación de plutonio del metal uranio es relativamente sencilla. Esto se debe a que el plutonio es un elemento distinto del uranio, con sus propias propiedades químicas.

El elemento plutonio es químicamente tóxico en el mismo sentido que lo son el plomo y el arsénico. Ataca al sistema nervioso y puede causar parálisis. La muerte puede producirse si la dosis es suficientemente grande. Por fortuna, el plutonio no permanece en su forma elemental durante mucho tiempo porque se combina rápidamente con oxígeno para formar tres compuestos: PuO, $PuO_2$ y $Pu_2O_3$, todos los cuales son relativamente benignos por sus características químicas. No se disuelven en agua ni en sistemas biológicos. Estos compuestos de plutonio no atacan el sistema nervioso y se ha encontrado que son químicamente inocuos.

Sin embargo, el plutonio en cualquier forma es radiactivamente tóxico. Es más tóxico que el uranio, aunque menos tóxico que el radio. El plutonio emite partículas alfa de alta energía, que destruyen células en lugar de sólo perturbarlas y conducir a mutaciones. Es interesante que las células dañadas, y no las células destruidas, sean las que contribuyen al cáncer. Es por esto que el plutonio se clasifica relativamente bajo como sustancia cancerígena. El mayor peligro que plantea el plutonio al ser humano es la posibilidad de utilizarlo en bombas de fisión nuclear. Su utilidad está en los reactores de fisión, en particular en los reactores reproductores.

**FIGURA 34.10**

Cuando un núcleo de U-238 absorbe un neutrón, se convierte en un núcleo de U-239. En alrededor de media hora, este núcleo emite una partícula beta, lo que resulta en un núcleo de más o menos la misma masa pero con una unidad más de carga. Éste ya no es uranio; es un nuevo elemento: *neptunio*. Después de que el neptunio, a su vez, emite una partícula beta, se convierte en plutonio. (En ambos eventos también se emite un antineutrino, que no se muestra.)




**PUNTO DE CONTROL**

**¿Por qué el plutonio no existe en cantidades considerables en los depósitos naturales de minerales?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

En la escala del tiempo geológico, el plutonio tiene una vida media relativamente corta, de modo que cualquiera que exista se produjo por transmutaciones muy recientes de isótopos de uranio.

**pti**

- El plutonio con grado de armamento suele ser 93% Pu-239.

**VIDEO: Plutonio**

## 34.3 El reactor reproductor

**SCREENCAST: Plutonio y reproducción**

Una característica notable del poder de la fisión es la *reproducción* de plutonio a partir del U-238 no fisionable. La fisión libera neutrones que convierten el U-238 no fisionable, relativamente abundante, en U-239, que tiene decaimiento beta y se convierte en Np-239, el cual, a su vez, tiene decaimiento beta y se convierte en plutonio fisionable: Pb-239. De modo que, además de la abundante energía producida, en el proceso se reproduce el combustible de fisión a partir del relativamente abundante U-238.

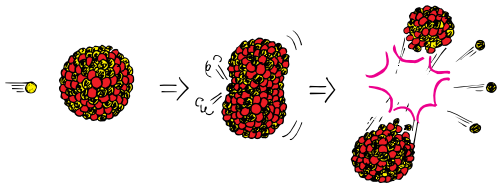


**FIGURA 34.11**
El Pu-239 o el U-233, así como el U-235, experimentan fisión cuando capturan un neutrón.

En todos los reactores de fisión ocurre cierta reproducción, pero un **reactor reproductor** está diseñado de manera específica para reproducir más combustible fisionable del que se le pone. Usar un reactor reproductor es análogo a llenar el tanque de gasolina de tu automóvil con agua, agregar algo de gasolina, luego conducir el automóvil, ¡y tener más gasolina al final del viaje que al comienzo! El principio básico del reactor reproductor es muy atractivo: después de algunos años de funcionamiento, una planta eléctrica con un reactor reproductor puede producir enormes cantidades de energía al tiempo que reproduce el doble de combustible que tenía al principio.

Algunas personas protestan contra la energía nuclear: "¡No a la energía nuclear!". Por el contrario, la postura de este libro es "¡Conoce la energía nuclear!": primero conoce algo de sus promesas, así como sus inconvenientes, antes de decir *sí* o *no* a la energía nuclear.

El inconveniente de los reactores reproductores es la enorme complejidad para lograr un funcionamiento satisfactorio y seguro. Estados Unidos abandonó los reproductores en la década de 1980, y sólo Francia, Alemania, India y China todavía invierten en ellos. Los funcionarios en estos países señalan que los suministros de uranio natural son limitados. Con las tasas actuales de consumo, todas las fuentes naturales de uranio pueden agotarse en un siglo. Entonces, los países que decidan usar reactores reproductores bien podrían tener que excavar en los desechos radiactivos que alguna vez enterraron.[9]

**PUNTO DE CONTROL**

**Completa estas reacciones, que ocurren en un reactor reproductor:**

$^{239}_{92}\text{U} \rightarrow \_\_\_\_ + {}^{0}_{-1}e$

$^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow \_\_\_\_ + {}^{0}_{-1}e$

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

$^{239}_{93}\text{Np}$; $^{239}_{94}\text{Pu}$. (Los antineutrinos también se emiten en estos procesos de decaimiento beta, y escapan sin que se les observe.)

## 34.4 Energía eléctrica mediante fisión

**SCREENCAST: Energía de fisión**

La energía disponible de la fisión nuclear se introdujo al mundo en la forma de bombas nucleares. Esta violenta imagen todavía influye en la manera de ver la energía nuclear. Si se agrega a esto el terrible desastre de 1986 en Chernobyl, en la Unión Soviética, se descubrirá que muchas personas opinan que la energía nuclear es una tecnología diabólica. No obstante, alrededor de 20% de la energía eléctrica en Estados Unidos

[9]Muchos científicos nucleares no consideran que el enterramiento profundo sea una solución deseable al problema de los desechos nucleares. Los dispositivos que se estudian en la actualidad podrían, en principio, convertir los átomos radiactivos de larga vida del combustible del reactor empleado, en átomos no radiactivos de corta vida. Existe la posibilidad de que los desechos nucleares no importunen a las generaciones futuras de manera indefinida, como suele pensarse.

es generada por reactores de fisión nuclear. Estos reactores, en ocasiones denominados *nukes*, son simplemente hornos nucleares. Al igual que los hornos de combustible fósil, no hacen nada más elegante que hervir agua para producir vapor para una turbina. La mayor diferencia práctica es la cantidad de combustible involucrado. Un kilogramo de combustible uranio, una pieza más pequeña que una pelota de béisbol, produce más energía que 30 vagones de carga repletos de carbón.

Una desventaja de la energía de fisión es que se generan productos de desecho radiactivos. Los núcleos atómicos ligeros son más estables cuando se componen de igual número de protones y neutrones, y son principalmente los núcleos pesados los que necesitan más neutrones que protones para su estabilidad. Por ejemplo, en el U-235 hay 143 neutrones pero sólo 92 protones. Cuando el uranio se fisiona en dos elementos de peso medio, los neutrones adicionales de sus núcleos los hacen inestables. Por tanto, estos fragmentos son radiactivos, y la mayor parte de ellos tiene vidas medias muy cortas. Sin embargo, algunos de ellos tienen vidas medias de miles de años. Para la eliminación segura de estos productos de desecho, así como de los materiales que se vuelven radiactivos en la producción de combustibles nucleares, se necesitan toneles y procedimientos especiales de almacenamiento. Si bien la energía de fisión se remonta a medio siglo, la tecnología de eliminación de desechos radiactivos sigue en la etapa de desarrollo.

Los beneficios de la energía de fisión son (1) ofrece abundante electricidad; (2) ahorra muchos miles de millones de toneladas de carbón, petróleo y gas natural cada año que literalmente se convierten en calor y humo, y en el largo plazo pueden ser más valiosos como fuentes de moléculas orgánicas; y (3) elimina las megatoneladas de óxidos de azufre y otras toxinas, así como el gas de efecto invernadero, dióxido de carbono, que se liberan al aire cada año por la quema de estos combustibles.

Los inconvenientes son (1) el problema de almacenar desechos radiactivos, (2) la producción de plutonio y el peligro de la proliferación de armas nucleares, (3) la liberación a bajo nivel de materiales radiactivos en el aire y el subsuelo, y, lo más importante, (4) el riesgo de una liberación accidental de grandes cantidades de radiactividad.

Para tener una opinión razonada es indispensable no sólo examinar los beneficios y los inconvenientes de la energía de fisión, sino también que se comparen sus beneficios e inconvenientes con los de otras fuentes de energía.

**FIGURA 34.12**
El reactor nuclear se aloja en el interior de un edificio de contención con forma de domo, que está diseñado para prevenir la liberación de isótopos radiactivos en caso de un accidente.

**pti**

- Los desechos nucleares pueden "quemarse" en reactores especiales que los transmutan en elementos más benignos y, por tanto, esto refuta la objeción de que los desechos nucleares se vierten en el regazo de las generaciones futuras.

**PUNTO DE CONTROL**

**Más radiación ambiental rodea a una planta eléctrica típica de carbón que la que rodea a una planta de fisión. ¿Qué indica esto del blindaje que suele rodear a los dos tipos de plantas eléctricas?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Las plantas eléctricas de carbón son, al parecer, tan estadounidenses como la tarta de manzana y (al momento de escribir esto) no necesitan un blindaje que restrinja la emisión de partículas radiactivas. Las plantas de fisión, por otra parte, exigen un blindaje que asegure rigurosos niveles bajos de emisiones radiactivas.

## 34.5 Equivalencia masa-energía

En 1905, Albert Einstein descubrió que la masa en realidad es energía "coagulada". Masa y energía son dos caras de la misma moneda, como se enuncia en su celebrada ecuación $E = mc^2$. En esta ecuación, $E$ representa la energía que cualquier masa tiene en reposo, $m$ representa la masa y $c$ es la rapidez de la luz. La cantidad $c^2$ es la constante de proporcionalidad de energía y masa. Esta relación entre energía y masa es la clave para entender por qué y cómo se libera energía en las reacciones nucleares.

Mientras más energía esté almacenada en una partícula, mayor será la masa de la partícula. ¿La masa de un nucleón dentro de un núcleo es la misma que la masa del mismo

**SCREENCAST: Equivalencia masa-energía**

**FIGURA 34.13**
Para sacar un nucleón de un núcleo atómico se requiere trabajo. Este trabajo entra en la energía de masa.

nucleón afuera de un núcleo? Esta pregunta puede responderse al considerar el trabajo que se requeriría para separar los nucleones de un núcleo. A partir de la física se sabe que el trabajo, que es energía utilizada, es igual a *fuerza* × *distancia*. Piensa en la cantidad de fuerza requerida para sacar un nucleón del núcleo a través de una distancia suficiente para superar la fuerza nuclear fuerte atractiva, lo que se indica de manera cómica en la Figura 34.13. Se requeriría un enorme trabajo. Este trabajo es energía agregada al nucleón que se jala.

La diferencia de masa entre un nucleón afuera de un núcleo y la masa promedio de los nucleones encerrados dentro de un núcleo se relacionan con la "energía de enlace" del núcleo. Para el uranio, la diferencia de masa es de más o menos 0.8%, u 8 partes por 1,000. La reducción de 0.8% en la masa promedio del nucleón dentro de un átomo de uranio indica la energía de enlace del núcleo: cuánto trabajo se requeriría para desmontar el núcleo.[10] Dicho trabajo sería de alrededor de 8 millones de eV por nucleón.

La verificación experimental de esta conclusión es uno de los triunfos de la física moderna. La masa promedio por nucleón dentro de los núcleos de los isótopos de los diversos elementos puede medirse con una precisión de 1 parte por millón o mejor. Un medio para hacer esto es con un *espectrómetro de masas* (Figura 34.14).

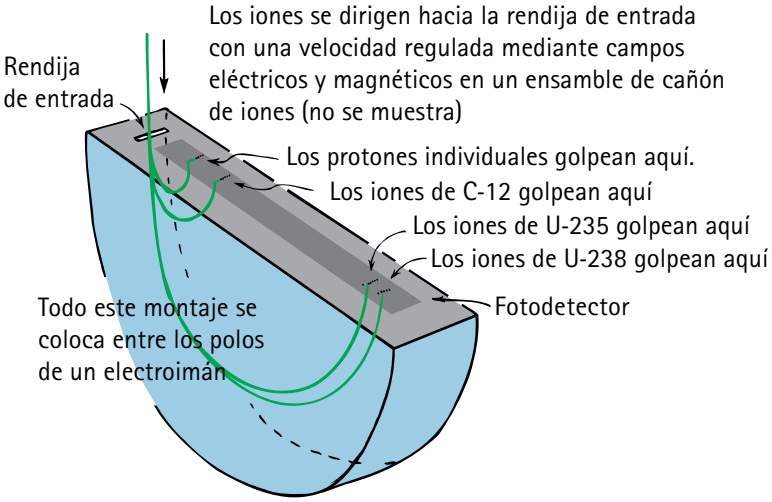



**FIGURA 34.14**
El espectrómetro de masas. Los iones con una rapidez fija se dirigen hacia el "tambor" semicircular, donde se hacen mover en trayectorias semicirculares mediante un campo magnético intenso. ¿Cuáles se moverán en arcos más pequeños: los núcleos pesados o los núcleos ligeros?

En un espectrómetro de masas, los iones cargados con rapideces idénticas se dirigen hacia un campo magnético, donde se desvían en arcos circulares. Mientras mayor sea la inercia del ión, más resistirá a la desviación y mayor será el radio de su trayectoria curva. La fuerza magnética hace que los iones más pesados se muevan en arcos más largos y los iones más ligeros en arcos más pequeños. Los iones pasan a través de rendijas de salida, donde se recolectan, o golpean un detector, como una película fotográfica. Un isótopo se elige como estándar, y su posición sobre la película del espectrómetro de masas se usa como punto de referencia. El estándar es el isótopo común del carbono, C-12, a cuya masa atómica se le asigna el valor de 12.00000 unidades de masa atómica. Recuerda que la unidad de masa atómica (uma) se define como precisamente un doceavo la masa del átomo de carbono-12 común. Con esta referencia se miden los valores de masa atómica de los otros átomos. Puedes ver que, en un átomo de C-12, la masa promedio por nucleón es exactamente 1.00000. Esto es menos que la masa o de un átomo de hidrógeno o de un neutrón libre, que son, de manera respectiva, 1.007825 y 1.00867 uma.

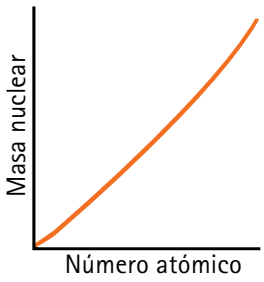



**FIGURA 34.15**
La gráfica muestra cómo la masa nuclear aumenta con el número atómico creciente.

En la Figura 34.15 se presenta una gráfica de la masa nuclear como función del número atómico. La gráfica se inclina hacia arriba con el número atómico creciente

[10]En sentido estricto, ésta se agrega a la masa combinada del nucleón que se remueve y el núcleo que queda detrás. En realidad no es posible medir la masa de un nucleón individual dentro de un núcleo. Sólo puede medirse la masa total del núcleo y dividirla entre el número de nucleones que hay ahí para obtener la masa promedio por nucleón, que es lo que resulta ser aproximadamente 0.8% menor que la masa de un nucleón libre.

**TABLA 34.1 MASAS Y MASAS POR NUCLEÓN DE ALGUNOS ISÓTOPOS**

| *Isótopo* | *Símbolo* | *Masa (uma)* | *Masa/Nucleón (uma)* |
|---|---|---|---|
| Neutrón | n | 1.008665 | 1.008665 |
| Hidrógeno | $^{1}_{1}H$ | 1.007825 | 1.007825 |
| Deuterio | $^{2}_{1}H$ | 2.01410 | 1.00705 |
| Tritio | $^{3}_{1}H$ | 3.01605 | 1.00535 |
| Helio-4 | $^{4}_{2}He$ | 4.00260 | 1.00065 |
| Carbono-12 | $^{12}_{6}C$ | 12.00000 | 1.000000 |
| Hierro-56 | $^{56}_{26}Fe$ | 55.93494 | 0.99884 |
| Cobre-63 | $^{63}_{29}CU$ | 62.92960 | 0.99888 |
| Criptón-90 | $^{90}_{36}Kr$ | 89.91952 | 0.99911 |
| Bario-143 | $^{143}_{56}Ba$ | 142.92063 | 0.99944 |
| Uranio-235 | $^{235}_{92}U$ | 235.04393 | 1.00019 |

justo como se espera; esto indica que los elementos son más masivos conforme aumenta el número atómico. (La pendiente aumenta porque existen proporcionalmente más neutrones en los átomos más masivos.)

Una gráfica más importante es la que contiene la masa promedio *por nucleón* para los elementos del hidrógeno al uranio (Figura 34.16). Quizá ésta sea la gráfica más importante de este libro, porque es la clave para entender la energía asociada con los procesos nucleares, tanto fisión como fusión. Para obtener la masa promedio por nucleón, divide la masa total de un átomo por el número de nucleones en el núcleo. (De manera similar, si divides la masa total de una habitación llena con gente entre el número de personas en la habitación, obtienes la masa promedio por persona.) El principal hecho que se aprende a partir de la Figura 34.16 es que la masa promedio por nucleón varía de un núcleo a otro.

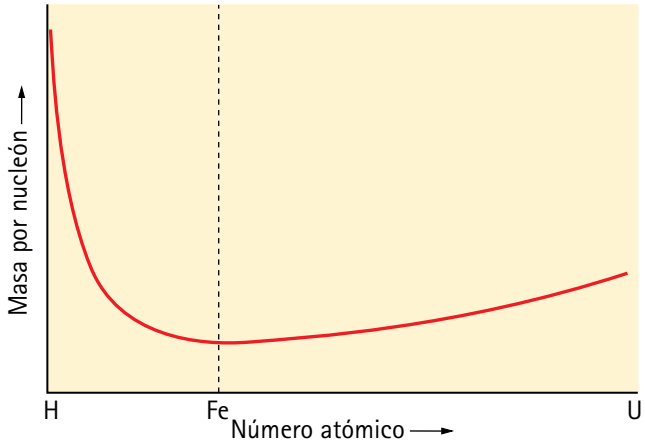


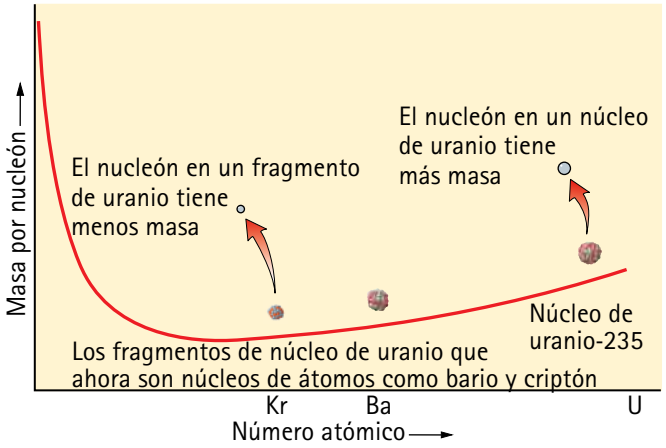

**FIGURA 34.16**
La gráfica muestra que la masa promedio por nucleón en el núcleo varía de un extremo de la tabla periódica al otro. Puede decirse que los nucleones individuales tienen más masa en los núcleos más ligeros (hidrógeno), menos masa en los núcleos de hierro, y una masa intermedia en los núcleos más pesados (uranio). (La escala vertical está exagerada.)

La mayor masa por nucleón ocurre para el hidrógeno, cuyo protón central solo no tiene energía de enlace para bajar su masa. Conforme se avanza hacia elementos más allá del hidrógeno, la Figura 34.16 indica que la masa por nucleón disminuye y es mínima para el hierro. El núcleo de hierro retiene sus nucleones con más precisión que cualquier otro núcleo. Más allá del hierro, la tendencia se invierte conforme la repulsión entre protones se vuelve más importante y la energía de enlace por nucleón disminuye de modo gradual (lo que significa que la masa por nucleón aumenta poco a poco). Esto continúa a lo largo de la lista de elementos.

A partir de la Figura 34.17 puedes ver por qué se libera energía cuando un núcleo de uranio se divide en dos núcleos con número atómico más bajo. Cuando el núcleo de uranio se divide, las masas de los dos fragmentos de fisión se encuentran aproximadamente a medio camino entre las masas del uranio y del hidrógeno sobre la escala

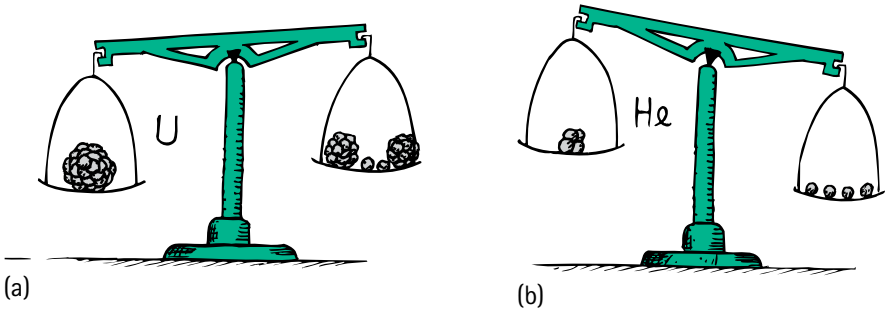
La gráfica de la Figura 34.16 revela la energía del núcleo atómico, probablemente la principal fuente de energía en el Universo, razón por la cual puede considerarse como la gráfica más importante de este libro.

**FIGURA 34.17**
La masa promedio de cada nucleón en un núcleo de uranio es mayor que la masa promedio de cada nucleón en cualquiera de sus fragmentos de fisión nuclear. Esta reducción en masa se transforma en energía. En consecuencia, la fisión nuclear es un proceso de liberación de energía.




horizontal de la gráfica. Es más importante observar que la masa por nucleón en los fragmentos de fisión es *menor que* la masa por nucleón cuando el mismo conjunto de nucleones se combina en el núcleo de uranio. Cuando esta reducción en masa se multiplica por la rapidez de la luz al cuadrado, ésta es igual a 200,000,000 eV, la energía producida por cada núcleo de uranio que experimenta fisión. Como se mencionó antes, la mayor parte de esta enorme cantidad de energía es la energía cinética de los fragmentos de la fisión.

**FIGURA 34.18**
La masa de un núcleo *no* es igual a la suma de las masas de sus partes. (a) Los fragmentos de fisión de un núcleo pesado como el uranio son menos masivos que el núcleo de uranio. (b) Dos protones y dos neutrones son más masivos en sus estados libres que cuando se combinan para formar un núcleo de helio.




La energía de enlace reduce la masa de un núcleo en exactamente la equivalente en masa ($E/c^2$) de dicha energía de enlace. Mientras más energía de enlace, menos masa. El núcleo de hierro tiene la mayor energía de enlace por nucleón y la menor masa por nucleón.

Puedes considerar que la curva de masa por nucleón es un valle de energía que comienza en el punto más alto (hidrógeno), baja precipitadamente hacia el punto más bajo (hierro), y luego sube de manera más gradual hasta el uranio. El hierro está en el fondo del valle de energía y es el núcleo más estable. Esto significa que es el núcleo más firmemente enlazado; para separarlo en sus nucleones constituyentes se requiere más energía por nucleón que para cualquier otro nucleón.

Toda la energía nuclear en la actualidad se obtiene a partir de la fisión nuclear. Una fuente de energía a largo plazo más prometedora debe encontrarse en el lado izquierdo del valle de la energía.

**TABLA 34.2 GANANCIA DE ENERGÍA A PARTIR DE LA FISIÓN DE URANIO**

| | |
|---|---|
| Reacción: | $^{235}U + n \rightarrow {}^{143}Ba + {}^{90}Kr + 3n + \Delta m$ |
| Equilibrio de masa: | $235.04393 + 1.008665 = 142.92063 + 89.91952 + 3(1.008665) + \Delta m$ |
| Pérdida de masa: | $\Delta m = 0.186$ uma |
| Ganancia de energía:* | $\Delta E = \Delta mc^2 = 0.186 \text{ uma} \times 931 \text{ Mev/uma} = 173 \text{ Mev}$ |
| Ganancia energía/nucleón: | $\Delta E/236 = 173 \text{ Mev}/236 = 0.73 \text{ MeV/nucleón}$ |

*931 MeV es el equivalente en energía de 1 uma; de ahí el factor de conversión 931 MeV/uma. Además de lo anterior, existe una demora adicional en la liberación de energía de más o menos 25 MeV de los fragmentos de fisión radiactivos, para una liberación total de energía por evento de fisión de cerca de 200 MeV.

## FÍSICA EN LA SEGURIDAD AEROPORTUARIA

Una versión del espectrómetro de masas que se muestra en la Figura 34.14 se emplea en la seguridad aeroportuaria. En lugar de una separación electromagnética se utiliza la movilidad iónica para descubrir ciertas moléculas, principalmente las que tienen bajo contenido en nitrógeno, que son características de los explosivos. El personal de seguridad toma una muestra de tu equipaje u otras pertenencias con un pequeño disco de papel, que luego colocan en un aparato que lo calienta hasta expulsar vapor de éste. Las moléculas en el vapor se ionizan mediante la exposición a radiación beta de una fuente radiactiva. La mayoría de las moléculas se convierten en iones positivos, mientras que las moléculas con alto contenido en nitrógeno se vuelven negativas, y por ello se mueven en contra de un flujo de aire hacia un detector con carga positiva. El tiempo para que un ión negativo llegue al detector indica la masa del ión: mientras más pesado sea el ión, más tardará en llegar al detector.

El mismo proceso ocurre en los escaneos corporales, en los cuales una persona se pone de pie momentáneamente en una región cerrada del tamaño de una caseta telefónica, donde ráfagas de aire

ascendente impactan sobre el cuerpo. Entonces el aire es "olfateado" con la misma técnica, en busca de unos 40 tipos de explosivos y 60 tipos de residuos de narcóticos. Listo: luz verde significa que no se detectó nada; y luz roja significa… ¡oh, oh!

### PUNTO DE CONTROL

1. **¡Espera un minuto! Si los protones y los neutrones aislados tienen masas mayores que 1.0000 uma, ¿por qué 12 de ellos en un núcleo de carbono no tienen una masa combinada mayor que 12.0000 uma?**
2. **Corrige el siguiente enunciado incorrecto: Cuando un elemento pesado, como el uranio, experimenta fisión, hay menos nucleones después de la reacción que antes.**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Cuando sacas un nucleón del núcleo, realizas trabajo sobre éste y gana energía. Al momento que dicho nucleón regresa al núcleo, *pierde* energía. Perder energía significa perder masa. Es como si cada nucleón, en promedio, adelgazara hasta una masa de exactamente 1.0000 uma cuando se une con los otros 11 nucleones para formar C-12. Si de nuevo los sacas, obtendrás la masa original. Esto es debido a que $E = mc^2$.
2. Cuando un elemento pesado, como el uranio, experimenta fisión, no hay menos nucleones después de la reacción. En vez de ello, hay *menos masa* en el mismo número de nucleones.

## 34.6 Fusión nuclear

La inspección de la gráfica de masa por nucleón frente al número atómico en la Figura 34.19 muestra que la parte más inclinada de la colina energética va desde el hidrógeno hasta el hierro. La energía se gana conforme los núcleos ligeros se *funden* (lo que quiere decir que se combinan). Esta combinación de núcleos es la **fusión nuclear**, lo opuesto de la fisión nuclear. A partir de la Figura 34.19 puedes ver que, conforme te mueves a lo largo de la lista de elementos, del hidrógeno al hierro (el lado izquierdo del valle de energía), la masa promedio por nucleón disminuye. Por tanto, si dos núcleos pequeños se funden, la masa del núcleo fusionado sería menor a la masa de los dos núcleos individuales antes de la fusión. Conforme los núcleos ligeros se fusionan se libera energía.

**SCREENCAST:** Fusión nuclear

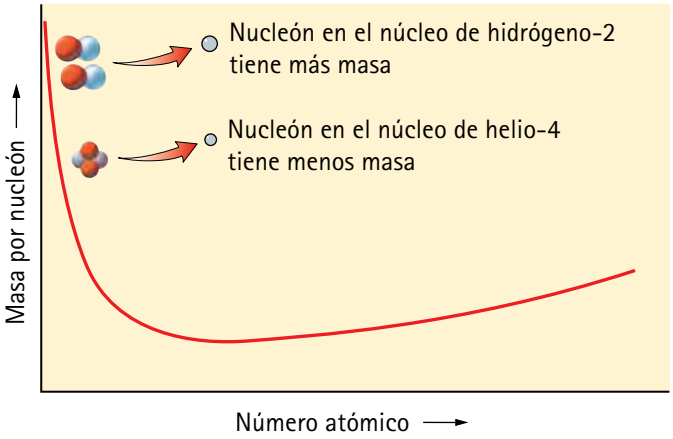
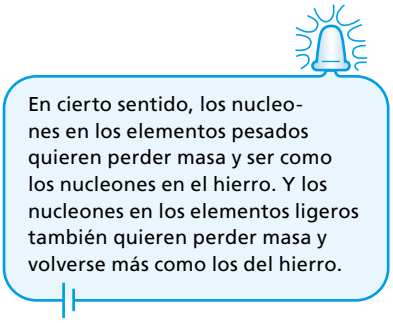



**FIGURA 34.19**
La masa promedio de un nucleón en el hidrógeno es mayor que su masa promedio cuando se fusiona con otro para convertirse en helio. La masa reducida es masa que se convirtió en energía, razón por la cual la fusión nuclear de elementos ligeros es un proceso de liberación de energía.




Considera la fusión del hidrógeno. Para que ocurra una reacción de fusión, los núcleos deben chocar con una rapidez muy grande, para superar su repulsión eléctrica mutua. Las rapideces requeridas corresponden a las temperaturas extremadamente altas que se encuentran en el Sol y otras estrellas. La fusión producida por temperaturas altas se llama **fusión termonuclear**. En las temperaturas altas del Sol, aproximadamente 657 millones de toneladas de hidrógeno se fusionan para generar 653 millones de toneladas de helio cada segundo. Los 4 millones de toneladas de masa "perdida" se convierten en energía. Tales reacciones son, de manera muy literal, quemas nucleares.

Curiosamente, la mayor parte de la energía de la fusión nuclear está en la energía cinética de los fragmentos. Cuando los fragmentos se detienen y capturan, la energía de la fusión se convierte en calor. En el Sol, este calor termina como fotones radiados desde la superficie. En las reacciones de fusión del futuro, parte de este calor se transformará en electricidad.

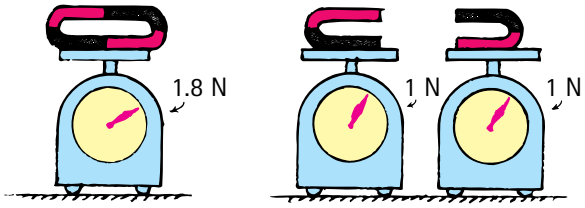



**FIGURA 34.20**
Ejemplo ficticio: los "imanes de hidrógeno" pesan más cuando están separados que cuando están juntos.

La fusión termonuclear es análoga a la combustión química ordinaria. Tanto en la quema química como en la nuclear, una temperatura alta inicia la reacción; la liberación de energía por la reacción mantiene una temperatura suficiente para extender el fuego. El resultado neto de la reacción química es una combinación de átomos en moléculas más firmemente enlazadas. En las reacciones nucleares, el resultado neto son núcleos que están enlazados de manera más firme. En ambos casos, la masa disminuye conforme se libera energía. La diferencia entre las quemas química y nuclear en esencia está en la escala: la energía de la nuclear está en MeV, y la energía de la química en eV (en consecuencia, hay pequeñas pérdidas en masa indetectables químicamente).

En las reacciones de fisión, la cantidad de materia que se convierte en energía es aproximadamente 0.1%; en la fusión, puede ser de hasta 0.7%. Estos números se aplican ya sea que el proceso tenga lugar en bombas, en reactores o en estrellas. En la Figura 34.21 se muestran dos reacciones de fusión típicas. La mayoría de las reacciones producen al menos un par de partículas; por ejemplo, un par de núcleos de deuterio que se fusionan pueden producir un núcleo de helio-3 y un neutrón en lugar de un núcleo de helio-4 solo. Cualquier reacción es correcta en lo que se refiere a la agregación de nucleones y cargas, pero el caso del núcleo solo no está en concordancia con la

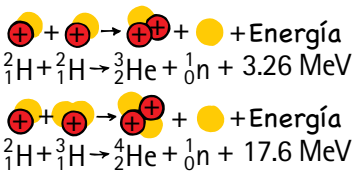



**FIGURA 34.21**
Dos de muchas reacciones de fusión.

**TABLA 34.3 GANANCIA DE ENERGÍA A PARTIR DE FUSIÓN DE ISÓTOPOS DE HIDRÓGENO**

| | |
|---|---|
| Reacción: | ${}^2H + {}^3H \rightarrow {}^4_2He + n + \Delta m$ |
| Equilibrio de masa: | $2.01410 + 3.01605 = 4.00260 + 1.008665 + \Delta m$ |
| Cambio en la masa: | $\Delta m = 0.01888$ uma |
| Ganancia de energía: | $\Delta E = mc^2$; 0.01888 uma $\times$ 931 Mev/uma = 17.6 Mev |
| Ganancia energía/nucleón: | $\Delta E/5 = 17.6$ Mev/5 = 3.5 Mev/nucleón |

conservación de la cantidad de movimiento y de la energía. Si un solo núcleo de helio se aleja después de la reacción, agrega cantidad de movimiento que no estaba ahí inicialmente. O, si permanece sin movimiento, no hay mecanismo para la liberación de energía. De este modo, debido a que una sola partícula de producto no puede moverse ni quedarse quieta, no se forma. La fusión por lo regular requiere la creación de al menos dos partículas para compartir la energía liberada.[11]

La Tabla 34.3 muestra la ganancia de energía a partir de la fusión de los isótopos de hidrógeno deuterio y tritio. Ésta es la reacción propuesta por las plantas de fusión de plasma del futuro. De acuerdo con el plan, los neutrones de alta energía escaparán del plasma en el recipiente del reactor y calentarán un manto (capa fértil) circundante de material para proporcionar energía útil. Los núcleos de helio que permanezcan ayudarán a mantener caliente el plasma. Otra reacción, no descrita aquí, proporcionará el tritio, que no se encuentra de forma natural sobre la Tierra (debido a su corta vida media de 12 años).

Los elementos un tanto más pesados que el hidrógeno liberan energía cuando se fusionan. Pero liberan menor cantidad de energía por reacción de fusión que el hidrógeno. La fusión de elementos todavía más pesados se produce en las etapas más avanzadas de la evolución de una estrella. La energía liberada por gramo durante las diversas etapas de fusión del helio al hierro representa sólo alrededor de una cuarta parte de la energía liberada en la fusión del hidrógeno al helio.

Antes del desarrollo de la bomba atómica (bomba de fisión), las temperaturas requeridas para superar la repulsión mutua de los protones e iniciar la fusión nuclear en la Tierra eran inalcanzables.[12] Pero la explosión de una bomba atómica genera temperaturas considerablemente más altas que las del centro del Sol, lo que abre la puerta a una bomba termonuclear. La primera explosión termonuclear tuvo lugar en 1952 y fue seguida por las "bombas H" en 1954. Mientras que la masa crítica del material fisionable limita el tamaño de una bomba de fisión (bomba atómica), en una bomba de fusión no se impone tal límite. Así como no existe límite para el tamaño de un depósito para el almacenamiento de petróleo, teóricamente no existe límite para el tamaño de una bomba de fusión. Al igual que con el petróleo en un depósito de almacenamiento, cualquier cantidad de combustible de fusión puede almacenarse con seguridad hasta que se enciende. Aunque un simple fósforo puede encender un depósito de petróleo, nada menos energético que una bomba de fisión puede encender una bomba termonuclear. Puedes ver que no existe una cosa como una bomba de hidrógeno "bebé". No puede ser menos energética que su detonador, que es una bomba de fisión.

La bomba de hidrógeno es otro ejemplo de un descubrimiento aplicado a propósitos destructivos más que constructivos. El potencial lado constructivo del cuadro es la liberación controlada de enormes cantidades de energía limpia.

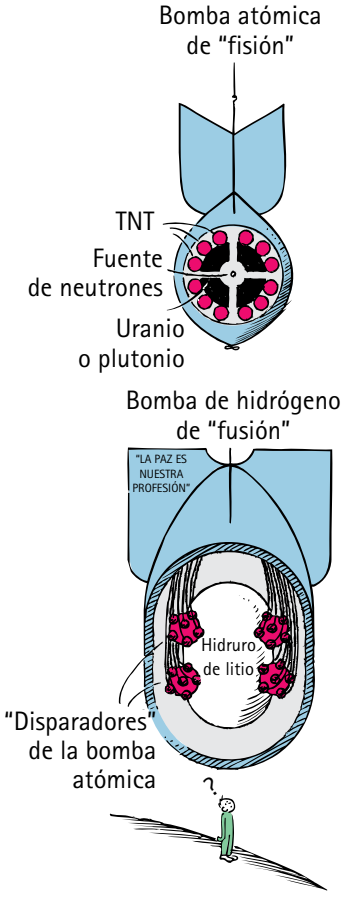



**FIGURA 34.22**
Bombas de fisión y de fusión.

[11]Una de las reacciones en el ciclo de fusión protón-protón del Sol sí tiene un estado final de una partícula. Es protón + deuterón → He-3. Esto ocurre porque la densidad en el centro del Sol es suficientemente grande como para que las partículas "espectador" compartan la liberación de energía. De modo que, incluso en este caso, la energía liberada pasa a dos o más partículas. La fusión en el Sol involucra reacciones más complicadas (¡y más lentas!) en las que una pequeña parte de la energía también aparece en forma de rayos gamma y neutrinos. Los neutrinos escapan sin obstáculos desde el centro del Sol y bañan el sistema solar. De forma interesante, la fusión de los núcleos en el Sol es un proceso ocasional porque el espaciamiento medio entre los núcleos es enorme, incluso a las altas presiones en su centro. Es por ello que el Sol tardará unos 10 mil millones de años en consumir su combustible hidrógeno.

[12]Sin embargo, en los aceleradores de partículas pueden crearse reacciones de fusión a pequeña escala.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Primero se afirmó que la energía nuclear se liberaba cuando los átomos se dividían. Ahora se afirma que la energía nuclear se libera cuando los átomos se combinan. ¿Esto es una contradicción? ¿Cómo puede liberarse energía mediante procesos opuestos?**
2. **Para obtener energía del elemento hierro, ¿los núcleos de hierro deberían fisionarse o fusionarse?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La energía se libera en cualquier reacción nuclear en la cual la masa de los núcleos después de la reacción sea menor que la masa de los núcleos antes de ésta. Cuando los núcleos ligeros, como los del hidrógeno, se fusionan para formar núcleos más pesados, la masa nuclear total disminuye. Por tanto, la fusión de núcleos ligeros libera energía. Cuando los núcleos pesados, como los del uranio, se dividen para convertirse en núcleos más ligeros, la masa nuclear total también disminuye. Por tanto, la división de los núcleos pesados libera energía. Para liberar energía, todo se trata de "disminuir la masa", sin importar que esto sea químico o nuclear.
2. Ninguno, porque el hierro está en el mismo fondo de la curva (valle de energía). Si fusionas dos núcleos de hierro, el producto se encuentra en alguna parte sobre la curva arriba y a la derecha del hierro, lo que significa que el producto tiene mayor masa por nucleón. Si divides un núcleo de hierro, los productos se encuentran sobre la curva arriba y a la izquierda del hierro, lo que nuevamente significa una mayor masa por nucleón. Puesto que en ninguna reacción ocurre una reducción de masa, jamás se libera energía.

**pti**

- La energía liberada en la fusión de un par de núcleos de hidrógeno es menor que en la fisión de un núcleo de uranio. Pero, debido a que existen más átomos en un gramo de hidrógeno que en un gramo de uranio, gramo por gramo, la fusión de hidrógeno libera varias veces más energía que la fisión del uranio.

## 34.7 Cómo controlar la fusión

**SCREENCAST: Fusión controlada**

El combustible para la fusión nuclear es el hidrógeno, el elemento más abundante en el Universo. La reacción que funciona mejor a una temperatura "moderada" es la fusión de los isótopos de hidrógeno deuterio (${}^{2}_{1}\mathrm{H}$) y tritio (${}^{3}_{1}\mathrm{H}$). El deuterio se encuentra en el agua ordinaria. El deuterio en los océanos del mundo tiene el potencial de liberar muchísima más energía que todos los combustibles fósiles del mundo y mucho más que el suministro de uranio del mundo. El tritio, que tiene una vida media de 12 años, está casi por completo ausente de la naturaleza, pero puede crearse al hacer reaccionar deuterones (como en la Figura 34.21) o en una reacción que involucre al litio.

Por tanto, la fusión es una fuente de ensueño para satisfacer las necesidades de energía a largo plazo. Sin embargo, el pronóstico para la energía de fusión en el futuro previsible es desalentador. Se han probado varios esquemas de fusión. El primero de los enfoques, que todavía se persigue, involucra el confinamiento de un plasma caliente con un campo magnético. Otros enfoques han aprovechado láseres de alta energía. Un plan es soltar municiones de hidrógeno en un fuego cruzado de láseres que encendería pulsos de energía de fusión. Los problemas, después de muchos años de esfuerzos, han sido abrumadores. Todos los escenarios han buscado un "punto de equilibrio energético", en donde la salida de energía sea al menos igual a la entrada de energía. Excepto por breves rachas, esto no ha ocurrido.

¿Habrá algún avance, en el que la salida sostenida de energía en un dispositivo será mayor que la entrada de energía para iniciar y sostener la fusión? ¿Se encontrará una forma de dominar la energía del Sol y las estrellas? No se sabe. Cuando eso suceda, los humanos podrán sintetizar sus propios elementos y producir energía en el proceso, como siempre han hecho las estrellas. En ese momento, la fusión probablemente sería la principal fuente de energía para las generaciones por venir. Sigue consultando Internet, y por el momento agradece que la fusión termonuclear en la estrella más cercana sea responsable de la luz y de todo el brillo que brinda a la Tierra.

Las reacciones de fusión pueden producir núcleos más grandes que los del hierro; de otro modo, ningún elemento más allá del hierro existiría en la tabla periódica. Pero dichas reacciones de fusión no producen energía. La *consumen* y la convierten en masa, como ocurre en las supernovas. Todos los elementos en tu cuerpo, excepto el hidrógeno, probablemente se formaron en las estrellas. ¡Piensa que tu ser amado es polvo de estrellas!

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Fisión nuclear.** La división del núcleo de un átomo pesado, como el uranio-235, en dos núcleos más pequeños, acompañada con la liberación de mucha energía.

**Reacción en cadena.** Reacción autosostenida en la que los productos de un evento de la reacción estimulan más eventos de la reacción.

**Masa crítica.** Mínima cantidad de masa de material fisionable en un reactor o bomba nuclear que sostendrá una reacción en cadena.

**Reactor reproductor.** Reactor de fisión que está diseñado para reproducir más combustible fisionable del que se le pone al convertir isótopos no fisionables en isótopos fisionables.

**Fusión nuclear.** Combinación de núcleos atómicos ligeros para formar núcleos más pesados, por lo general con la liberación de mucha energía.

**Fusión termonuclear.** Fusión nuclear producida por una temperatura alta.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 34.1 Fisión nuclear

1. ¿Por qué una reacción en cadena usualmente no ocurre en las minas de uranio?
2. ¿Por qué una reacción en cadena es más probable que ocurra en un gran trozo de uranio que en uno pequeño?
3. ¿Qué se entiende por la idea de masa crítica?
4. ¿Cuál soltará más neutrones: dos trozos separados de uranio o los mismos trozos juntos?
5. ¿Cuáles fueron los dos métodos usados en el Proyecto Manhattan, durante la Segunda Guerra Mundial, para separar el U-235 del U-238?

### 34.2 Reactores de fisión nuclear

6. ¿Cuáles son los tres posibles destinos de los neutrones en el metal uranio?
7. ¿Cuáles son los cuatro principales componentes de un reactor de fisión?
8. ¿Qué componentes son los salvaguardas para evitar que un reactor genere energía fuera de control?
9. ¿Qué isótopo se produce cuando el U-238 absorbe un neutrón?
10. ¿Qué isótopo se produce cuando el U-239 emite una partícula beta?
11. ¿Qué isótopo se produce cuando el Np-239 emite una partícula beta?
12. ¿Qué tienen en común el U-235 y el Pu-239?

### 34.3 El reactor reproductor

13. ¿Cuál es el efecto de colocar pequeñas cantidades de isótopos fisionables con grandes cantidades de U-238?
14. Menciona dos isótopos que experimentan fisión nuclear.
15. ¿Qué elemento reacciona en un reactor reproductor para reproducir combustible nuclear?

### 34.4 Energía eléctrica mediante fisión

16. ¿En qué forma un reactor nuclear es similar a una planta convencional de combustible fósil?
17. Cita tres ventajas principales de la energía de fisión. Cita cuatro inconvenientes importantes.

### 34.5 Equivalencia masa-energía

18. ¿Qué celebrada ecuación muestra la equivalencia entre la masa y la energía?
19. ¿Para sacar un nucleón de un núcleo atómico se requiere trabajo? ¿El nucleón, una vez afuera, tiene más energía de la que tenía cuando estaba adentro del núcleo? ¿En qué forma está dicha energía?
20. ¿Qué iones, con la misma carga y rapidez, se desvían menos en un espectrómetro de masas?
21. ¿Cuál es la diferencia básica entre las gráficas de las Figuras 34.15 y 34.16?
22. ¿En cuál elemento la masa por nucleón es mayor? ¿Menor?
23. ¿Cómo se compara la masa por nucleón en el uranio, con la masa por nucleón en sus fragmentos de fisión?
24. ¿En qué se convierte la masa por nucleón "perdida" en las reacciones de fisión y de fusión?
25. Si la gráfica de la Figura 34.16 se ve como un valle de energía, ¿qué puedes decir acerca de la energía de las transformaciones nucleares que avanzan hacia el hierro?

### 34.6 Fusión nuclear

26. Cuando un par de núcleos de hidrógeno se fusionan para crear helio, ¿cómo se compara la masa del núcleo de helio resultante, con la suma de las masas nucleares antes de la fusión?
27. Para que el helio libere energía, ¿debe fisionarse o fusionarse?

### 34.7 Cómo controlar la fusión

28. ¿Qué isótopos del hidrógeno se fusionan mejor a temperaturas "moderadas"?
29. ¿Cuál isótopo del hidrógeno, deuterio o tritio es abundante y cuál es escaso?
30. ¿Qué tipo de energía nuclear es responsable de la luz solar?

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

31. Escribe una carta al abuelo o a la abuela y háblales de la energía nuclear. Explica por qué las minas de uranio podrían cerrarse si el plutonio de las actuales cabezas nucleares en el mundo se desmantelara y usara como combustible de fisión para reactores eléctricos. Cita tanto los pros como los contras de las plantas eléctricas de fisión nuclear y explica cómo la comparación afecta tu visión personal de los reactores nucleares. Explica también cómo difieren la fisión y la fusión nucleares.

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

32. El kilotón, que se usa para medir la energía liberada en una explosión atómica, es igual a $4.2 \times 10^{12}$ J (aproximadamente la energía liberada en la explosión de 1,000 toneladas de TNT). Al recordar que 1 kilocaloría de energía eleva la temperatura de 1 kg de agua en 1°C y que 4,184 joules es igual a 1 kilocaloría, demuestra que la energía liberada por una bomba de 20 kilotones es suficiente para calentar $4.0 \times 10^8$ kilogramos de agua (casi la mitad de un millón de toneladas) hasta 50°C.
33. El isótopo de litio usado en una bomba de hidrógeno es el Li-6, cuyo núcleo contiene tres protones y tres neutrones. Cuando un núcleo de Li-6 absorbe un neutrón, se produce un núcleo del isótopo de hidrógeno más pesado, el tritio. ¿Cuál es el otro producto de esta reacción? ¿Cuál de estos dos productos alimenta la reacción explosiva?
34. Una importante reacción de fusión tanto en las bombas de hidrógeno como en los reactores de fusión controlada es la "reacción DT", en la cual un deuterón y un tritón (núcleos de isótopos de hidrógeno pesado) se combinan para formar una partícula alfa y un neutrón con la liberación de mucha energía. Usa la conservación de la cantidad de movimiento para explicar por qué el neutrón que resulta de esta reacción recibe aproximadamente 80% de la energía, mientras que la partícula alfa obtiene sólo alrededor de 20%.

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

35. Supón que todos los siguientes núcleos experimentan fisión en un par de fragmentos de masas iguales o casi iguales. Con la tabla periódica y la Figura 34.16 como guías, clasifica, de mayor a menor, la *reducción* en la masa por nucleón para estos núcleos después de la fisión.
    a. Uranio
    b. Plata
    c. Oro
    d. Hierro
36. Clasifica, de mayor a menor, la *reducción* de la masa por nucleón que acompaña a la fusión de los siguientes pares de núcleos:
    a. Dos núcleos de hidrógeno
    b. Dos núcleos de carbono
    c. Dos núcleos de aluminio
    d. Dos núcleos de hierro

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

37. ¿Las plantas eléctricas nucleares de hoy en día usan fisión, fusión o ambas?
38. ¿Por qué la mena de uranio no experimenta espontáneamente una reacción en cadena?
39. Algunos núcleos pesados, que contienen incluso más protones que el núcleo de uranio, experimentan una "fisión espontánea" y se dividen sin absorber un neutrón. ¿Por qué la fisión espontánea sólo se observa en los núcleos más pesados?
40. ¿Por qué un neutrón es una mejor bala nuclear que un protón?
41. ¿Por qué el escape de neutrones será proporcionalmente menor en un trozo grande de material fisionable que en un trozo pequeño?
42. Una esfera de 56 kg de U-235 constituye una masa crítica. Si la esfera se aplana en una forma de panqueque, ¿todavía sería crítica? Explica.
43. ¿Cuál forma es probable que necesite más material para una masa crítica: un cubo o una esfera? Explica.
44. ¿La distancia promedio que recorre un neutrón a través de un material fisionable antes de escapar aumenta o disminuye cuando dos trozos de material fisionable se ensamblan en una pieza? ¿Este ensamble aumenta o disminuye la probabilidad de una explosión?
45. El U-235 libera un promedio de 2.5 neutrones por fisión, mientras que Pu-239 libera un promedio de 2.7 neutrones por fisión. En consecuencia, ¿cuál de estos elementos puedes esperar que tenga la menor masa crítica?
46. El uranio y el torio abundan en varios depósitos minerales. Sin embargo, el plutonio podría existir sólo en cantidades excesivamente pequeñas en tales depósitos. ¿Cuál es tu explicación?
47. ¿Por qué, después de que una barra de combustible de uranio llega al final de su ciclo de combustible (usualmente 3 años), la mayoría de su energía proviene de la fisión de plutonio?
48. Si un núcleo de $^{232}_{90}$Th absorbe un neutrón y el núcleo resultante experimenta dos decaimientos beta sucesivos (que emiten electrones), ¿qué núcleo resulta?
49. El agua que pasa a través del núcleo del reactor de un reactor de fisión moderado con agua no pasa hacia la turbina. En vez de ello, el calor se transfiere hacia un ciclo de agua separado que está completamente afuera del reactor. ¿Por qué se hace esto?
50. ¿Por qué el carbono es mejor que el plomo como moderador en los reactores nucleares?
51. ¿La masa de un núcleo atómico es mayor o menor que la suma de las masas de los nucleones separados que lo

componen? ¿Por qué las masas de los nucleones no suman la masa nuclear total?

52. La liberación de energía de la fisión nuclear está ligada al hecho de que los núcleos más pesados tienen alrededor de 0.1% más masa por nucleón que los núcleos cerca del medio de la tabla periódica de los elementos. ¿Cuál sería el efecto sobre la liberación de energía si la cifra, en lugar de 0.1%, fuera de 1%?
53. ¿En qué forma son similares las reacciones de fisión y fusión? ¿Cuáles son las principales diferencias entre estas reacciones?
54. ¿Cómo es que la quema química es similar a la fusión nuclear?
55. Mezclar átomos de cobre y cinc produce la aleación llamada latón. ¿Qué se produciría con la fusión de núcleos de cobre y cinc?
56. Los átomos de oxígeno e hidrógeno se combinan para formar agua. Si los tres núcleos en una molécula de agua se fusionaran, ¿qué elemento se produciría?
57. Si un par de átomos de carbono se fusionaran, y el producto emitiera una partícula beta, ¿qué elemento se produciría?
58. ¿Cuál produce más energía: la fisión de un solo núcleo de uranio o la fusión de un par de núcleos de deuterio? ¿La fisión de un gramo de uranio o la fusión de un gramo de deuterio? (¿Por qué difieren tus respuestas?)
59. ¿Por qué, a diferencia del combustible de fisión, no hay límite para la cantidad de combustible de fusión que puede almacenarse de manera segura en una localidad?
60. Si una reacción de fusión no produce isótopos radiactivos considerables, ¿por qué una bomba de hidrógeno produce significativos efectos radiactivos colaterales?
61. Menciona al menos dos de las principales ventajas potenciales de la producción de energía eléctrica mediante fusión en lugar de la producción de energía eléctrica mediante fisión.
62. Al hidrógeno ordinario en ocasiones se le llama el combustible perfecto porque, cuando se quema, el producto de la combustión es agua inofensiva. De este modo, ¿por qué no se abandonan las energías de fisión y fusión, por no mencionar la energía de combustible fósil, y sólo se usa hidrógeno?
63. Si un núcleo de U-238 se divide en dos piezas iguales, y cada pieza emite una partícula alfa, ¿qué elementos se producen?
64. La energía de fisión principalmente está en la energía cinética de sus productos. ¿En qué se convierte esta energía en un reactor comercial?
65. El reactor original de Fermi "apenas" era crítico porque el uranio natural que usó contenía menos de 1% del isótopo fisionable U-235 (vida media: 713 millones de años). ¿Y si, en 1942, la Tierra hubiese tenido una edad de 9 mil millones de años, en lugar de 4.5 mil millones? ¿Fermi habría podido hacer que un reactor fuera crítico con el uranio natural?

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

66. ¿Por qué probablemente la fisión nuclear no se usará directamente para impulsar automóviles? ¿Cómo podría usarse de manera indirecta para impulsar automóviles?
67. Para predecir la liberación de energía aproximada de una reacción de fisión o de una reacción de fusión, explica cómo un físico utiliza la curva de la Figura 34.16 o una tabla de masas nucleares y la ecuación $E = mc^2$.
68. ¿Qué núcleos resultarán si un núcleo de U-235, después de absorber un neutrón y convertirse en U-236, se divide en dos fragmentos idénticos?
69. Los núcleos pesados pueden fusionarse, por ejemplo, al disparar un núcleo de oro hacia otro idéntico. ¿Tal proceso produce energía o cuesta energía? Explica.
70. Los núcleos ligeros pueden dividirse. Por ejemplo, un deuterón, que es una combinación protón-neutrón, puede dividirse en un protón separado y un neutrón separado. ¿Tal proceso produce energía o cuesta energía? Explica.
71. ¿Cuál proceso liberaría energía del oro: la fisión o la fusión? ¿Cuál liberaría energía del carbono? ¿Del hierro?
72. Si el uranio se dividiera en tres segmentos de igual tamaño, en lugar de dos, ¿se liberaría más energía o menos energía? Defiende tu respuesta con base en la Figura 34.16.
73. Supón que la curva de la Figura 34.16 para la masa por nucleón frente al número atómico tuviera la forma de la curva en la Figura 34.15. Entonces, ¿las reacciones de fisión nuclear producirían energía? ¿Las reacciones de fusión nuclear producirían energía? Defiende tus respuestas.
74. Los "imanes de hidrógeno" de la Figura 34.20 pesan más cuando están separados que cuando se combinan. ¿Cuál sería la diferencia básica si el ejemplo ficticio consistiera de "imanes nucleares" que fueran la mitad de pesados que el uranio?
75. En una reacción de fisión nuclear, ¿cuál tiene más masa: el uranio inicial o sus productos?
76. En una reacción de fusión nuclear, ¿cuál tiene más masa: los isótopos de hidrógeno iniciales o los productos de la fusión?
77. La fusión nuclear sostenida todavía no se logra y sigue siendo una promesa de abundante energía futura. Sin embargo, la energía que siempre ha sostenido a la humanidad ha sido la energía de la fusión nuclear. Explica.
78. Explica cómo el decaimiento radiactivo siempre ha calentado la Tierra desde el interior y cómo la fusión nuclear siempre ha calentado la Tierra desde el exterior.
79. El mundo no ha sido el mismo desde el descubrimiento de la inducción electromagnética y sus aplicaciones a los motores y los generadores eléctricos. Especula y menciona algunos de los cambios mundiales que es probable que sigan a la llegada de exitosos reactores de fusión.
80. Discute, y realiza una comparación de la contaminación producida por las plantas eléctricas convencionales de combustible fósil y las de fisión nuclear. Considera las contaminaciones térmica, química y radiactiva.
81. El U-235 tiene una vida media de aproximadamente 700 millones de años. ¿Qué te dice esto acerca de la probabilidad de la existencia de energía de fisión en la Tierra dentro de mil millones de años?

# PARTE SIETE Examen de práctica de opción múltiple

*Elige la MEJOR respuesta a cada una de las siguientes:*

1. Los neutrones en un átomo usualmente se encuentran
   (a) dentro del núcleo. (c) Cualquiera de los anteriores.
   (b) afuera del núcleo. (d) Ninguno de los anteriores.
2. Las líneas espectrales de los elementos
   (a) son caóticas. (c) están ubicadas por su amplitud.
   (b) son ordenadas. (d) están en fase.
3. La energía de un fotón emitido se relaciona con su
   (a) frecuencia. (c) amplitud.
   (b) polarización. (d) dirección.
4. Las órbitas discretas de los electrones se entienden mejor cuando se modelan como
   (a) partículas de gran rapidez. (c) ondas.
   (b) partículas sobre resortes. (d) fotones.
5. A partir de la mecánica cuántica se aprende que un núcleo radiactivo está gobernado por
   (a) las leyes de Newton. (c) la certeza.
   (b) la probabilidad. (d) ninguna ley en absoluto.
6. La radiactividad ha estado en la Tierra desde
   (a) mediados del siglo XX. (c) la llegada de la tecnología médica.
   (b) la Revolución Industrial. (d) la formación de la Tierra.
7. ¿Cuál de éstos NO puede desviarse por medios eléctricos o magnéticos?
   (a) Rayos alfa. (c) Rayos gamma.
   (b) Rayos beta. (d) Todos ellos.
8. ¿Cuál tipo de radiación proveniente de fuentes cósmicas predomina en el interior de los aviones comerciales que vuelan a gran altitud?
   (a) Alfa. (c) Gamma.
   (b) Beta. (d) Ninguno de los anteriores.
9. En el núcleo atómico, las fuerzas eléctricas tienden a
   (a) mantener unidas las partículas. (c) producir movimiento orbital.
   (b) separar a las partículas. (d) cargar partículas.
10. Cuando los alimentos se exponen a radiación gamma, los alimentos
    (a) se vuelven ligeramente radiactivos.
    (b) no se vuelven radiactivos.
    (c) se echarán a perder más rápido.
    (d) deben evitarse.
11. La mayor parte de la radiación en la biosfera de la Tierra
    (a) es radiación de fondo natural.
    (b) es resultado de actividades militares.
    (c) proviene de plantas nucleares.
    (d) está en forma de rayos cósmicos.
12. El carbono-14 se produce principalmente por radiación cósmica en
    (a) la atmósfera.
    (b) los alimentos que ingieres.
    (c) el interior de la Tierra.
    (d) efectos colaterales de las pruebas con bombas nucleares.
13. Una muestra radiactiva tiene una vida media de 1 hora. Si comienzas con 1.000 gramo de ella a mediodía, ¿cuánto te quedará a las 3:00 p.m.?
    (a) 0.50 g (c) 0.125 g
    (b) 0.25 g (d) 0.0625 g
14. Cuando un elemento expulsa una partícula alfa, el número de masa del elemento resultante
    (a) se reduce en 2. (c) aumenta en 2.
    (b) se reduce en 4. (d) aumenta en 4.
15. Cuando un elemento expulsa una partícula alfa, el número atómico del elemento resultante
    (a) se reduce en 2. (c) aumenta en 2.
    (b) se reduce en 4. (d) aumenta en 4.
16. Cuando un elemento expulsa una partícula beta, el número atómico de dicho elemento
    (a) se reduce en 1. (c) se reduce en 2.
    (b) aumenta en 1. (d) aumenta en 2.
17. Cierto elemento emite 1 partícula alfa y sus productos entonces emiten 2 partículas beta en sucesión. El número atómico del elemento resultante cambia en
    (a) cero. (c) menos 2.
    (b) menos 1. (d) más 1.
18. Cuando un núcleo de uranio-238 emite una partícula alfa, lo que queda es
    (a) torio-242. (c) torio-234.
    (b) torio-238. (d) radio-214.
19. Cuando un protón se quita de un núcleo atómico, el átomo tiene una reducción en
    (a) carga. (c) masa.
    (b) energía. (d) Todos los anteriores.
20. Cuando piezas pequeñas de material se ensamblan en una pieza más grande, el área superficial combinada
    (a) aumenta enormemente. (c) disminuye.
    (b) aumenta ligeramente. (d) no cambia.
21. Las reacciones en cadena en un reactor de fisión son causadas por
    (a) energía cinética. (c) conversión de masa.
    (b) conversión de energía. (d) neutrones expulsados.
22. Un reactor de fisión nuclear común
    (a) calienta agua.
    (b) genera electricidad directamente.
    (c) obtiene energía de la nada.
    (d) es un gran contaminante de la atmósfera.
23. Comparadas con la masa de un átomo de uranio que experimenta fisión, las masas combinadas de los productos después de la fisión son
    (a) menos. (c) las mismas.
    (b) más. (d) cero.
24. Cuando se libera energía por el proceso de fusión, la masa total del material después del evento es
    (a) menos. (c) más.
    (b) la misma. (d) cero.
25. ¿Cuál proceso liberaría energía del oro: la fisión o la fusión? ¿Del carbono?
    (a) Oro: fisión; carbono: fusión (c) Oro: fisión; carbono: fisión
    (b) Oro: fusión; carbono: fisión (d) Oro: fusión; carbono: fusión
26. Si un núcleo de hierro se divide en dos, sus fragmentos de fisión tendrían
    (a) menos masa por nucleón. (c) la misma masa por nucleón.
    (b) más masa por nucleón. (d) o más o menos masa por nucleón.
27. ¿Cuál de estos tres elementos tiene más masa *por* nucleón?
    (a) Hidrógeno (c) Uranio
    (b) Hierro (d) La misma en cada uno
28. Tanto en la fisión como en la fusión, la energía se libera mientras la masa
    (a) disminuye.
    (b) permanece invariable; se conserva.
    (c) aumenta.
    (d) puede disminuir o aumentar.
29. En un evento de fisión o en un evento de fusión, una cantidad que permanece invariable es
    (a) la energía cinética. (c) el número de nucleones.
    (b) la masa. (d) el enlace de nucleones.
30. La ecuación que subyace más a la liberación de energía en un evento nuclear es
    (a) $E = hf$. (c) $E = Fd$.
    (b) $E = 1/2\ mv^2$. (d) $E = mc^2$.

*Después* de hacer elecciones razonadas y discutirlas con tus amigos, encuentra las respuestas en la página S-1.

PARTE OCHO

# Relatividad

Antes de la llegada de la relatividad especial, las personas pensaban que las estrellas estaban fuera del alcance de los seres humanos. Pero la distancia es relativa: depende del movimiento. En un marco de referencia que se mueve casi tan rápido como la luz, ¡la distancia se contrae y el tiempo se estira lo suficiente como para permitir a los futuros astronautas acceder a las estrellas y más allá! Somos como el pollito de Evan de la página 1 con la que inicia el libro, a punto de un nuevo comienzo. La física de Newton nos llevó a la Luna; la física de Einstein nos dirige a las estrellas. ¡Vives en una época muy emocionante!

35

CAPÍTULO 35

# Teoría de la relatividad especial


35.1 El movimiento es relativo

35.2 Postulados de la teoría de la relatividad especial

35.3 Simultaneidad

35.4 El espacio-tiempo y la dilatación del tiempo

35.5 Suma de velocidades

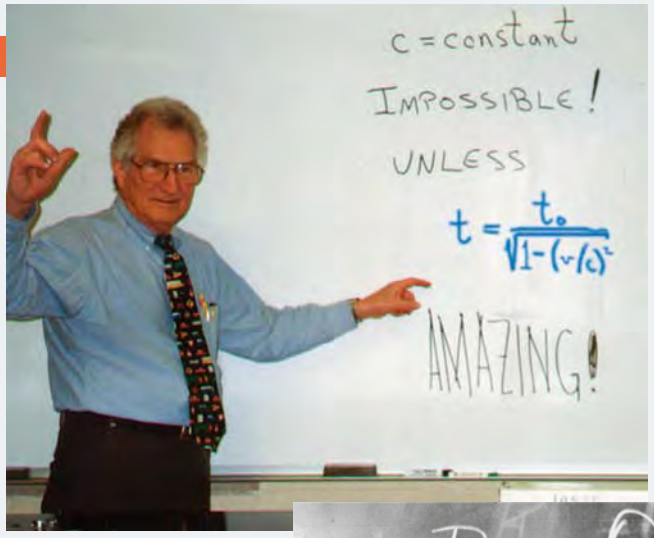
35.6 Contracción de la longitud

35.7 Cantidad de movimiento relativista

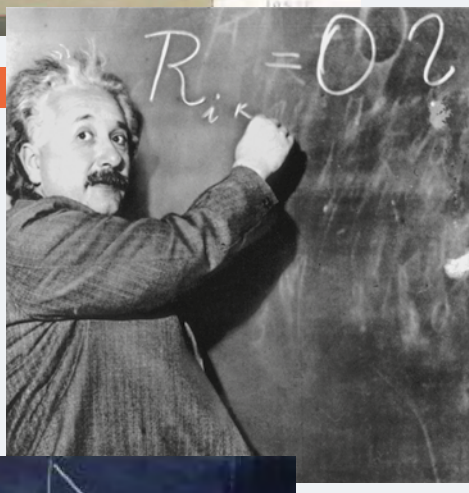
35.8 Masa, energía y $E = mc^2$

35.9 Principio de correspondencia

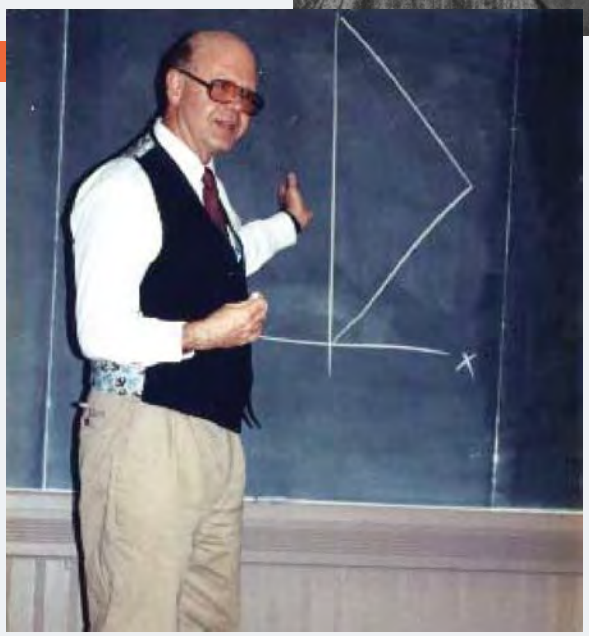

1




2



3



**1** El eminente físico Ken Ford en sus años de retiro ofrece asesorías a estudiantes de bachillerato y siempre subraya y comunica la belleza que observa en la física. **2** El más grande científico del siglo XX y uno de sus seres humanos favoritos. **3** Edwin F. Taylor, coautor de varios libros de relatividad, señala un diagrama que muestra dos trayectorias entre un punto de partida y el cruce de la línea final. Una trayectoria es recta, una de ida y vuelta. El gemelo que viaja de ida y vuelta regresa a casa más joven que el gemelo perezoso que se quedó en casa, un resultado sorprendente que muestra la idea esencial de Einstein de que el tiempo entre dos eventos depende de la trayectoria tomada entre ellos.

Albert Einstein nació en Ulm, Alemania, el 14 de marzo de 1879. De acuerdo con la leyenda popular, fue un niño lento y aprendió a hablar a una edad mucho mayor que el promedio; sus padres temieron durante un tiempo que pudiera tener retraso mental. Sin embargo, sus registros de la escuela primaria muestran que tenía un talento notable para las matemáticas, la física y para tocar el violín. Sin embargo, se rebeló ante la enseñanza practicada con una disciplina estricta y de memorización y fue expulsado justo cuando se preparaba para abandonar la escuela a la edad de 15 años. Principalmente por razones de negocios, su familia se mudó a Italia. El joven Einstein renunció a su ciudadanía alemana y se fue a vivir con amigos de la familia en Suiza. Ahí, con dos años menos que la edad habitual, fue aceptado para presentar el examen de admisión al renombrado Instituto Federal Sueco de Tecnología en Zurich. Pero, debido a dificultades con la lengua francesa, no aprobó el examen. Pasó un año en un bachillerato suizo en Aarau, donde fue "promovido con protesta en francés". Presentó de nuevo el examen de admisión en Zurich y lo aprobó.

Como joven y entusiasta estudiante de física en la década de 1890, a Einstein le inquietaba una diferencia entre las leyes de la mecánica de Newton y las leyes del electromagnetismo de Maxwell. Las leyes de Newton eran independientes del estado de movimiento de un observador; las leyes de Maxwell no lo eran, o así parecía. Alguien en reposo y alguien en movimiento encontrarían que las *mismas* leyes de la mecánica se aplicaban a un objeto en movimiento bajo estudio, pero descubrirían que leyes *diferentes* de electricidad y magnetismo se aplicaban a una carga en movimiento bajo estudio. Las leyes de Newton sugieren que no existe tal cosa como el movimiento absoluto; sólo importa el movimiento relativo. Pero las leyes de Maxwell parecían sugerir que el movimiento es absoluto.

En un célebre artículo de 1905 titulado "De la electrodinámica de los cuerpos en movimiento", escrito cuando tenía 26 años, Einstein demostró que las leyes de Maxwell pueden, después de todo, igual que las leyes de Newton, interpretarse como independientes del estado de movimiento de un observador, ¡pero con un costo! El costo de lograr esta visión unificada de las leyes de la naturaleza es una revolución total en la manera de entender el espacio y el tiempo.

Einstein demostró que, tal como las fuerzas entre las cargas eléctricas son afectadas por el movimiento, las mismísimas mediciones del espacio y del tiempo también son afectadas por el movimiento. Todas las mediciones del espacio y el tiempo dependen del movimiento relativo. Por ejemplo, la longitud de una nave espacial colocada sobre su plataforma de lanzamiento y el tictac de los relojes en su interior cambian cuando la nave espacial se pone en movimiento a gran rapidez. Siempre ha sido una noción de sentido común que, cuando te mueves, cambias de posición en el espacio, pero Einstein no prestó atención al sentido común y afirmó que, en el movimiento, también cambiamos el ritmo de avance hacia el futuro: el propio tiempo se altera. Einstein fue más allá y demostró que una consecuencia de la relación entre espacio y tiempo es una relación entre masa y energía, dada por la famosa ecuación $E = mc^2$.

Éstas son las ideas que componen este capítulo, las ideas de la relatividad especial, ideas tan remotas a tu experiencia cotidiana que comprenderlas exige un esfuerzo de tu mente. Bastará con que te familiarices con estas ideas, de modo que sé paciente contigo mismo si no las entiendes de inmediato. Tal vez en alguna era futura, cuando los viajes espaciales interestelares a gran rapidez sean frecuentes, tus descendientes encuentren que la relatividad tiene sentido.

## 35.1 El movimiento es relativo

Recuerda del Capítulo 3 que, cada vez que se habla de movimiento, siempre debes especificar el lugar desde el cual se observa y mide el movimiento. Por ejemplo, una persona que camina por el pasillo de un tren en movimiento puede caminar con una rapidez de 1 kilómetro por hora con respecto a su asiento, pero a 60 kilómetros por hora con respecto a la estación del ferrocarril. Al lugar desde el cual se observa y mide el movimiento se le denomina **marco de referencia**. Un objeto puede tener diferentes velocidades con respecto a diferentes marcos de referencia.

Para medir la rapidez de un objeto, primero elige un marco de referencia e imagina que en dicho marco de referencia te quedas quieto. Luego, mide la rapidez con la que el objeto se mueve con respecto a ti; esto es, con respecto al marco de referencia. En el ejemplo anterior, si mides desde una posición de reposo en el interior del tren, la rapidez de la persona que camina es de 1 kilómetro por hora. Si mides desde una posición de reposo en el suelo, la rapidez de la persona que camina es de 60 kilómetros por hora. Pero el suelo en realidad no está quieto, porque la Tierra gira como un trompo en torno a su eje polar. Dependiendo de cuán cerca del ecuador esté el tren, la rapidez de la persona que camina puede ser de hasta 1,600 kilómetros por hora con respecto a un marco de referencia en el centro de la Tierra. Y el centro de la Tierra se mueve

con respecto al Sol. Si colocas el marco de referencia en el Sol, la rapidez de la persona que camina en el interior del tren, que está en la Tierra que orbita, es de casi 110,000 kilómetros por hora. Y el Sol no está en reposo: orbita el centro de la galaxia, que se mueve con respecto a otras galaxias.

## El experimento de Michelson y Morley

¿Hay algún marco de referencia que esté quieto? ¿Acaso el propio espacio no está quieto y no se pueden hacer mediciones con respecto al espacio quieto? En 1887, los físicos estadounidenses A. A. Michelson y E. W. Morley, en un intento por responder estas preguntas, realizaron un experimento que se diseñó para medir el movimiento de la Tierra a través del espacio. Puesto que la luz viaja en ondas, se suponía entonces que algo vibraba en el espacio, algo misterioso llamado *éter*, que se pensaba que llenaba todo el espacio y funcionaba como un marco de referencia unido al espacio mismo. Estos físicos usaron un aparato muy sensible llamado *interferómetro* para hacer sus observaciones (Figura 35.1). En este instrumento, un haz de luz proveniente de una fuente monocromática se separaba en dos haces con trayectorias en ángulo recto entre sí; estos haces se reflejaban y se recombinaban para demostrar si había alguna diferencia en la rapidez promedio sobre las dos trayectorias de ida y vuelta. El interferómetro se montó con una trayectoria paralela al movimiento de la Tierra en su órbita. Luego, Michelson o Morley observaban en forma cuidadosa en busca de cualquier cambio en la rapidez promedio a medida que el aparato giraba para poner la otra trayectoria paralela al movimiento de la Tierra. El interferómetro era lo suficiente sensible para medir la diferencia en los tiempos del viaje redondo de la luz que iba a favor y en contra de la velocidad orbital de la Tierra de 30 kilómetros por segundo y de ida y vuelta a través de la trayectoria de la Tierra por el espacio. Pero no observaron cambios. Ninguno. Algo estaba mal con la razonable idea de que la rapidez de la luz medida por un receptor en movimiento debía ser su rapidez habitual en un vacío, $c$, más o menos la aportación del movimiento de la fuente o receptor. Muchas repeticiones y variaciones del experimento de Michelson y Morley por muchos investigadores demostraron el mismo resultado nulo. Éste fue uno de los hechos desconcertantes de la física cuando comenzó el siglo XX.

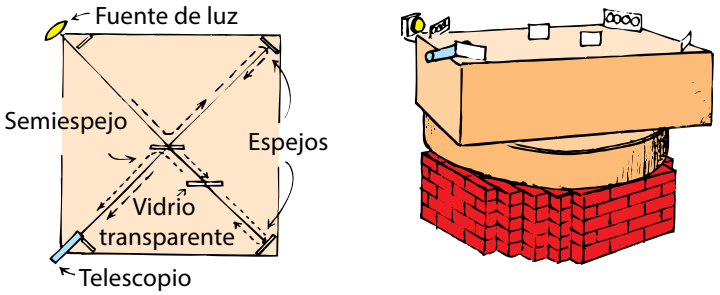



**FIGURA 35.1**
El interferómetro de Michelson y Morley, que divide un haz de luz en dos partes y luego las recombina para formar un patrón de interferencia después de que recorrieron diferentes trayectorias. La rotación se logró en su experimento cuando se puso a flote una masiva loza de arenisca en mercurio. Este diagrama esquemático muestra cómo el espejo medio plateado divide el haz en dos rayos. El vidrio transparente aseguró que ambos rayos atravesaran la misma cantidad de vidrio. En el experimento real, los espejos se colocaron en cada esquina para alargar las trayectorias.

Una interpretación del resultado desconcertante la sugirió el físico irlandés G. F. FitzGerald, quien propuso que la longitud del aparato experimental se encogía en la dirección en la que se movía sólo en la cantidad necesaria para contrarrestar la variación supuesta en la rapidez de la luz. El "factor de encogimiento" necesario, $\sqrt{1-v^2/c^2}$, fue resuelto por el físico holandés Hendrik A. Lorentz. Este factor aritmético explica la discrepancia, pero ni FitzGerald ni Lorentz tenían una teoría adecuada de por qué esto era así. Es interesante que el mismo factor lo haya derivado Einstein en su artículo de 1905, donde demostró que era el factor de encogimiento del espacio mismo, no sólo de la materia en el espacio.

No está claro cuánto influyó en Einstein el experimento de Michelson y Morley, si es que acaso lo hizo. De cualquier manera, Einstein anticipó la idea de que la rapidez de la luz en el espacio libre es la misma en todos los marcos de referencia,

una idea que era contraria a las ideas clásicas del espacio y tiempo. La rapidez es una razón entre la distancia a través del espacio y un correspondiente intervalo de tiempo. Para que la rapidez de la luz sea constante, debe descartarse la idea clásica de que el espacio y el tiempo son independientes entre sí. Einstein observó que el espacio y el tiempo estaban ligados, y, con postulados sencillos, construyó una profunda relación entre los dos.

## 35.2 Postulados de la teoría de la relatividad especial

Einstein no vio ninguna necesidad del éter. Junto con el éter estacionario también desapareció la noción de un marco de referencia absoluto. Todo movimiento es relativo, no con respecto a algún poste estacionario en el Universo, sino con respecto a marcos de referencia arbitrarios. Una nave espacial no puede medir su rapidez con respecto al espacio vacío, sino sólo con respecto a otros objetos. Si, por ejemplo, la nave espacial A rebasa a la nave espacial B en el espacio vacío, el hombre espacial A y la mujer espacial B observarán cada uno el movimiento relativo y, a partir de esta observación, ninguno de ellos podrá determinar quién se mueve y quien está en reposo.

SCREENCAST: Relatividad especial

Ésta es una experiencia familiar para el pasajero de un tren en una estación que mira por su ventana y observa que el tren de la vía contigua se mueve y pasa por su ventana. Está consciente sólo del movimiento relativo entre su tren y el otro tren, y no puede decir cuál tren se mueve. Él puede estar en reposo relativo con respecto al suelo y el otro tren puede estar en movimiento, o él puede estar en movimiento relativo con respecto al suelo y el otro tren puede estar en reposo, o ambos trenes pueden estar en movimiento relativo con respecto al suelo. Aquí lo importante es que, si estuvieras en un tren sin ventanas, no habría forma de determinar si el tren se mueve con velocidad invariable o está en reposo. Éste el primero de los postulados de Einstein de la teoría de la relatividad especial:

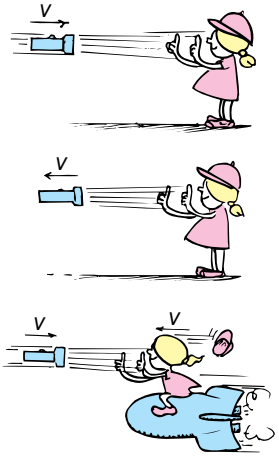



**FIGURA 35.2**
La medición de la rapidez de la luz es la misma en todos los marcos de referencia.

**Todas las leyes de la naturaleza son las mismas en todos los marcos de referencia que se mueven de manera uniforme.**

En un avión jet que viaja a 700 kilómetros por hora, por ejemplo, el café se vierte tal y como cuando el avión está en reposo; si balanceas un péndulo en el avión en movimiento, éste se balancea como si el avión estuviera en reposo sobre la pista. No hay un experimento físico que puedas realizar, ni siquiera con la luz, para determinar el estado de movimiento uniforme. Las leyes de la física en el interior de la cabina que se mueve de manera uniforme son las mismas que las que existen en un laboratorio estacionario.

Se puede diseñar cualquier cantidad de experimentos para detectar el movimiento acelerado, pero ninguno, de acuerdo con Einstein, para detectar el movimiento uniforme. Por tanto, el movimiento absoluto no tiene ningún significado. Sería muy extraño que las leyes de la mecánica variaran para los observadores que se mueven con diferentes rapideces. Ello significaría, por ejemplo, que un jugador de pool sobre un trasatlántico que se mueve con suavidad tendría que ajustar su estilo de juego a la rapidez del navío, o incluso a la temporada, ya que la Tierra varía su rapidez orbital en torno al Sol. La experiencia común es que no es necesario tal ajuste. Y, de acuerdo con Einstein, esta misma insensibilidad al movimiento se extiende al electromagnetismo. Ningún experimento, mecánico o eléctrico u óptico, ha revelado jamás movimiento absoluto. Esto es lo que significa el primer postulado de la relatividad.

Una de las preguntas que Einstein se planteó cuando era joven fue: ¿cómo se vería un haz de luz si viajaras junto a él? De acuerdo con la física clásica, el haz estaría en reposo para tal observador. Mientras más pensaba Einstein en esto, más se convencía

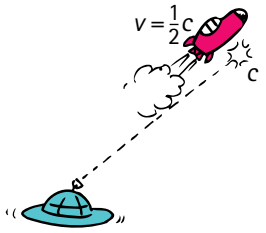



**FIGURA 35.3**
La rapidez de un destello de luz emitido por la estación espacial se mide en *c* por observadores tanto en la estación espacial como en la nave espacial.

de que uno no podría moverse con un haz de luz. Por último llegó a la conclusión de que, sin importar cuán rápidos dos observadores pudieran moverse uno con respecto al otro, cada uno de ellos mediría la rapidez de un haz de luz que pasara junto a ellos en 300,000 kilómetros por segundo. Éste fue el segundo postulado de su teoría de la relatividad especial:

**La rapidez de la luz en el espacio libre tiene el mismo valor medido para todos los observadores, sin importar el movimiento de la fuente o el movimiento del observador; esto es: la rapidez de la luz es una constante.**

Para ilustrar este enunciado, considera una nave espacial que parte desde la estación espacial que se muestra en la Figura 35.3. Un destello de luz, que viaja a 300,000 km/s, o *c*, se emite desde la estación. Sin importar la velocidad de la nave, un observador que viaja en ella ve que el destello de luz la pasa con la misma rapidez, *c*. Si un destello se envía a la estación desde la nave en movimiento, los observadores en la estación medirán la rapidez del destello como *c*. La rapidez de la luz tiene el mismo valor sin importar la rapidez de la fuente o del receptor. *Todos* los observadores que midan la rapidez de la luz descubrirán que tiene el mismo valor, *c*. Cuanto más se piensa en esto, más parece no tener sentido. Descubrirás que la explicación tiene que ver con la relación entre el espacio y el tiempo.

## 35.3 Simultaneidad

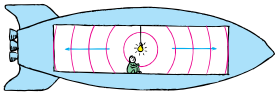


**FIGURA 35.4**
Desde el punto de vista del observador que viaja en el interior del compartimiento, la luz proveniente de la fuente recorre distancias iguales hacia ambos extremos del compartimiento y, en consecuencia, golpea ambos extremos en forma simultánea.

Una consecuencia interesante del segundo postulado de Einstein ocurre con el concepto de **simultaneidad**. Se dice que dos eventos son simultáneos si ocurren al mismo tiempo. Considera, por ejemplo, una fuente de luz en el centro exacto del compartimiento de una nave espacial (Figura 35.4). Cuando la fuente de luz se enciende, la luz se dispersa en todas direcciones con rapidez *c*. Puesto que la fuente de luz es equidistante de los extremos frontal y posterior del compartimiento, un observador en el interior del mismo descubre que la luz llega al extremo frontal en el mismo instante que llega al extremo posterior. Esto ocurre ya sea que la nave esté en reposo o en movimiento con velocidad constante. Los eventos de golpear el extremo posterior y golpear el extremo frontal ocurren *simultáneamente* para este observador en el interior de la nave espacial.

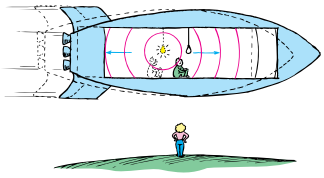


**FIGURA 35.5**
Los eventos de la luz que golpea los extremos frontal y posterior del compartimiento no son simultáneos desde el punto de vista de un observador en un marco de referencia diferente. Debido al movimiento de la nave, la luz que golpea el extremo posterior del compartimiento no tiene que ir tan lejos y golpea más pronto que la luz que llega al extremo frontal del compartimiento.

Pero, ¿qué hay de un observador externo que ve los mismos dos eventos desde otro marco de referencia, por decir, desde un planeta que no se mueve con la nave? Para dicho observador, estos mismos dos eventos *no* son simultáneos. A medida que la luz sale de la fuente, este observador ve la nave moverse hacia adelante, de modo que la parte posterior del compartimiento se mueve hacia el haz mientras el frente se aleja de él. En consecuencia, el haz que va hacia la parte posterior del compartimiento tiene una distancia más corta que recorrer que el haz que va hacia adelante (Figura 35.5). Dado que la rapidez de la luz es la misma en ambas direcciones, este observador externo ve el evento de la luz que golpea el extremo posterior del compartimiento *antes* de ver el evento de la luz que golpea el extremo frontal del compartimiento. (Desde luego, se asume que el observador puede discernir estas pequeñas diferencias.) Un poco de razonamiento mostrará que un observador en otra nave que pase en la dirección opuesta diría que la luz llega primero al extremo frontal.

**Dos eventos que son simultáneos en un marco de referencia no necesitan ser simultáneos en un marco que se mueve con respecto al primer marco.**

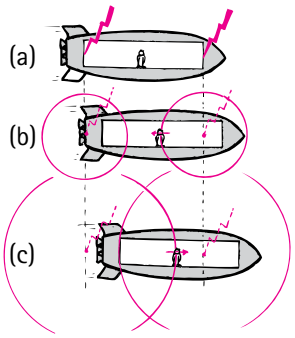
Esta no simultaneidad de los eventos en un marco que son simultáneos en otro, es un resultado meramente relativista, una consecuencia de que la luz siempre tenga la misma rapidez para todos los observadores.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¿Cómo es que la no simultaneidad de escuchar el trueno *después* de ver el relámpago es similar a la no simultaneidad relativista?**
2. **Supón que el observador que está de pie en un planeta en la Figura 35.5 ve un par de relámpagos que golpean en forma simultánea los extremos frontal y posterior del compartimiento de la nave espacial de gran rapidez. ¿Los golpes del relámpago serán simultáneos para un observador en medio del compartimiento de la nave espacial? (Supón aquí que el observador puede detectar cualquier pequeña diferencia del tiempo en que la luz viaja desde los extremos hasta el medio del compartimiento.)**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. ¡No lo es! El intervalo de tiempo entre escuchar el trueno y ver el relámpago no tiene nada que ver con observadores en movimiento o con la relatividad. En tal caso, sólo corriges el tiempo que las señales (trueno y luz) tardan en llegar a ti. La relatividad o simultaneidad es una discrepancia genuina entre las observaciones hechas por los observadores en movimiento relativo, y no sólo una disparidad entre diferentes tiempos de viaje para distintas señales.
2. No. Un observador en medio del compartimiento verá el relámpago que golpea el frente del compartimiento antes de ver el relámpago que golpea la parte posterior. Esto se muestra en las posiciones (a), (b) y (c) de la figura. En (a) se ven ambos relámpagos golpear los extremos del compartimiento al mismo tiempo, de acuerdo con el observador exterior. En la posición (b), la luz proveniente del relámpago frontal llega al observador en el interior de la nave espacial. Un poco después, en (c), la luz proveniente del relámpago posterior llega a este observador.




## 35.4 El espacio-tiempo y la dilatación del tiempo

Cuando miras las estrellas, te das cuenta de que en realidad estás viendo hacia atrás en el tiempo. Las estrellas que se ven más lejanas son las estrellas que se ven desde hace mucho más tiempo. Mientras más pienses en esto, más evidente será que el espacio y el tiempo deben tener una muy estrecha relación.

El espacio en el que vives es tridimensional; esto es, puedes especificar la posición de cualquier ubicación en el espacio con tres dimensiones. Por ejemplo, estas dimensiones podrían ser norte-sur, este-oeste y arriba-abajo. Si estuvieras en el rincón de una habitación rectangular y quisieras especificar la posición de cualquier punto de la habitación, podrías hacerlo con tres números. El primero sería el número de metros que el punto está a lo largo de una línea que une la pared lateral y el suelo; el segundo sería el número de metros que el punto está a lo largo de una línea que une la pared trasera adyacente y el suelo, y el tercero sería el número de metros que el punto está por encima del suelo o a lo largo de la línea vertical que une las paredes en el rincón. Los físicos se refieren a estas tres líneas como los *ejes coordenados* de un marco de referencia (Figura 35.6). Tres números (las distancias a lo largo de los ejes $x$, $y$ y $z$) especifican la posición de un punto en el espacio.

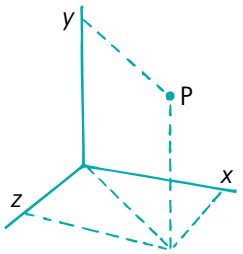



**FIGURA 35.6**
El punto P puede especificarse con tres números: las distancias a lo largo del eje $x$, el eje $y$ y el eje $z$.

También se utilizan tres dimensiones para especificar el tamaño de los objetos. Una caja, por ejemplo, se describe por su largo, ancho y altura. Pero las tres dimensiones no ofrecen la imagen completa. Hay una cuarta dimensión: el tiempo. La caja no siempre fue una caja con largo, ancho y altura determinados. Comenzó como una caja sólo en cierto punto en el tiempo, el día cuando la fabricaron. Ni siempre será una caja. En algún momento podría ser aplastada, quemada o destruida de algún otro modo. Así que las tres dimensiones del espacio son una descripción válida de la caja sólo durante un periodo

**SCREENCAST: Dilatación del tiempo**

$$\frac{\text{ESPACIO}}{\text{TIEMPO}} = \frac{\text{ESPACIO}}{\text{TIEMPO}} = c$$

**FIGURA 35.7**
Todas las mediciones de espacio y tiempo de la luz se unifican mediante *c*.

especificado. No puedes hablar de un modo significativo del espacio sin implicar el tiempo. Las cosas existen en el **espacio-tiempo**. Cada objeto, cada persona, cada planeta, cada estrella, cada galaxia existen en lo que los físicos llaman "el continuo espacio-tiempo".

Dos observadores que están lado a lado en reposo relativo entre sí comparten el mismo marco de referencia. Ambos estarían de acuerdo con las mediciones de intervalos de espacio y tiempo entre eventos dados, así que se dice que comparten el mismo ámbito de espacio-tiempo. Sin embargo, si entre ellos existe un movimiento relativo, los observadores no estarán de acuerdo con estas mediciones de espacio y tiempo. A rapideces ordinarias, las diferencias en sus mediciones son imperceptibles, pero a rapideces cercanas a la rapidez de la luz, las llamadas rapideces relativistas, las diferencias son apreciables. Cada observador está en un reino diferente del espacio-tiempo, y las mediciones de espacio y tiempo de un observador difieren de las mediciones del otro observador en algún otro reino del espacio-tiempo. Las mediciones no difieren al azar, sino en tal forma que cada observador siempre medirá la misma razón de espacio y tiempo para la luz: cuanto mayor sea la distancia medida en el espacio, mayor será el intervalo de tiempo medido. Esta razón constante de espacio y tiempo para la luz, *c*, es el factor unificador entre diferentes reinos de espacio-tiempo y es la esencia del segundo postulado de Einstein.

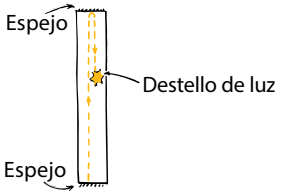



**FIGURA 35.8**
Un reloj de luz. Un destello de luz rebotará hacia arriba y hacia abajo entre espejos paralelos y marcará iguales intervalos de tiempo.

Examina la noción de que el tiempo puede estirarse. Imagina que de alguna forma puedes observar un destello de luz que rebota de ida y vuelta entre un par de espejos paralelos, como una bola que rebota de ida y vuelta entre el suelo y el techo. Si la distancia entre los espejos es fija, entonces el arreglo constituye un *reloj de luz* porque los viajes de ida y vuelta del destello tardan iguales intervalos de tiempo (Figura 35.8). Supón que este reloj de luz está en el interior de una nave espacial transparente de gran rapidez. Un observador que viajara con la nave y observara el reloj de luz (Figura 35.9a) vería el destello que se refleja recto hacia arriba y hacia abajo entre los dos espejos, como lo haría si la nave espacial estuviera en reposo. Este observador no ve efectos extraños. Nota que, dado que el observador está dentro de la nave y se mueve junto con ella, no hay movimiento relativo entre el observador y el reloj de luz; se dice que el observador y el reloj comparten el mismo marco de referencia en el espacio-tiempo.

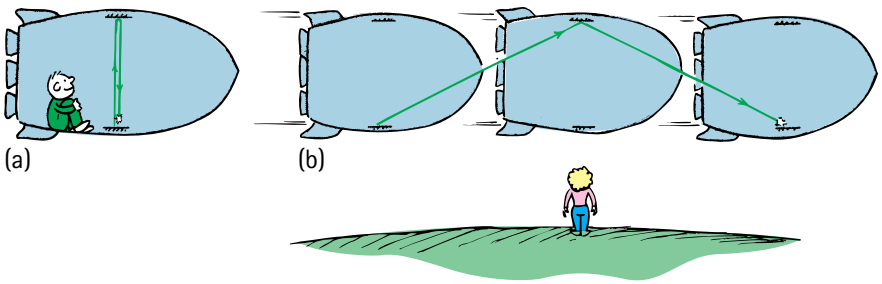



**FIGURA 35.9**
(a) Un observador que se mueve con la nave espacial nota el destello de luz que se mueve verticalmente entre los espejos del reloj de luz.
(b) Un observador que ve pasar la nave espacial en movimiento sigue el destello que se mueve a lo largo de una trayectoria diagonal.

Supón que ahora estás de pie en el suelo mientras la nave espacial pasa zumbando junto a ti con gran rapidez, por decir, la mitad de la rapidez de la luz. Las cosas son bastante diferentes desde este marco de referencia, porque no ves la trayectoria de la luz como un simple movimiento hacia arriba y hacia abajo. Debido a que cada destello se mueve en sentido horizontal mientras se mueve en sentido vertical entre los dos espejos, ves que el destello sigue una trayectoria diagonal. Observa en la Figura 35.9b que, desde tu marco de referencia en tierra, el destello recorre una *distancia más larga* conforme hace un viaje redondo entre los espejos, mucho más larga que la distancia que recorre en el marco de referencia del observador que viaja con la nave. Puesto que la rapidez de la luz es la misma en todos los marcos de referencia (segundo postulado de Einstein), el destello debe viajar durante un correspondiente tiempo más largo entre los espejos en tu marco que en el marco de referencia del observador a bordo. Esto se deduce de la definición de rapidez: distancia dividida entre tiempo. *La distancia diagonal más larga debe dividirse entre un intervalo de tiempo proporcionalmente más largo para producir un valor invariable para la rapidez de la luz*. Este alargamiento del tiempo se denomina **dilatación del tiempo**.

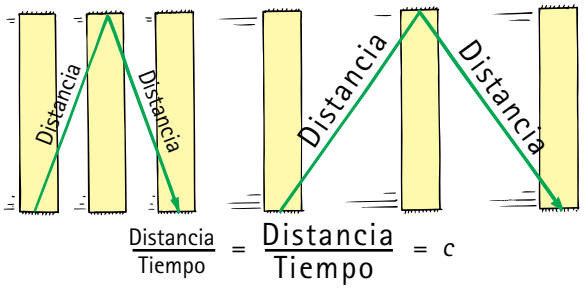



**FIGURA 35.10**
La distancia más larga cubierta por el destello de luz al seguir la trayectoria diagonal más larga de la derecha debe dividirse entre un correspondiente intervalo de tiempo más largo para producir un valor invariable para la rapidez de la luz.

En el ejemplo se consideró un reloj de luz, pero lo mismo sucede con cualquier tipo de reloj. Todos los relojes corren con más lentitud cuando se mueven que cuando están en reposo. La dilatación del tiempo tiene que ver, no con la mecánica del reloj, sino con la naturaleza del tiempo en sí.

La relación de la dilatación del tiempo para diferentes marcos de referencia en el espacio-tiempo puede derivarse de la Figura 35.10 con simple geometría y álgebra.[1] La relación entre el tiempo $t_0$ (llámalo *tiempo propio*) en el marco de referencia que se mueve con el reloj y el tiempo $t$ medido al ver el mismo reloj en otro marco de referencia (llámalo *tiempo relativo*) es:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

donde $v$ representa la rapidez del reloj en relación con el observador externo (la misma que la rapidez relativa entre los dos observadores) y $c$ es la rapidez de la luz. La cantidad:

$$\sqrt{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)}$$

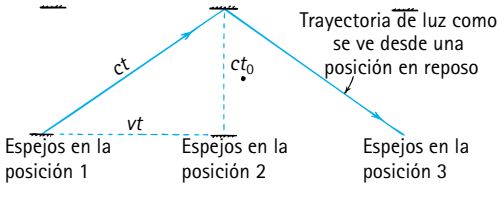
[1]En la figura de abajo el reloj de luz se muestra en tres posiciones sucesivas. Las líneas diagonales representan la trayectoria del destello de luz cuando parte del espejo inferior en la posición 1, se mueve hacia el espejo superior en la posición 2 y luego viaja de vuelta hacia el espejo inferior en la posición 3. Las distancias en el diagrama se nombran $ct$, $vt$ y $ct_0$, lo que se deriva del hecho de que la distancia recorrida por un objeto con movimiento uniforme es igual a su rapidez multiplicada por el tiempo.

El símbolo $t_0$ representa el tiempo que el destello tarda en moverse entre los espejos, medido desde un marco de referencia fijo respecto del reloj de luz. Éste es el tiempo del movimiento recto hacia arriba y hacia abajo. La rapidez de la luz es $c$ y la trayectoria de la luz se ve moverse una distancia vertical $ct_0$. Esta distancia entre espejos está en ángulos rectos respecto del movimiento del reloj de luz y es la misma en ambos marcos de referencia.

El símbolo $t$ representa el tiempo que el destello tarda en moverse de un espejo a otro, medido desde un marco de referencia en el cual el reloj de luz se mueve con rapidez $v$. Debido a que la rapidez de la luz es $c$ y el tiempo que tarda en ir de la posición 1 a la posición 2 es $t$, la distancia diagonal recorrida es $ct$. Durante este lapso $t$, el reloj (que viaja horizontalmente con rapidez $v$) se mueve una distancia horizontal $vt$ de la posición 1 a la posición 2.

Como la figura muestra, estas tres distancias constituyen un triángulo rectángulo en el cual $ct$ es la hipotenusa y $ct_0$ y $vt$ son los catetos. Un teorema bien conocido de la geometría, el teorema de Pitágoras, afirma que el cuadrado de la hipotenusa es igual a la suma de los cuadrados de los dos catetos. Si aplicas esta fórmula a la figura, obtienes

$$c^2t^2 = c^2t_0^2 + v^2t^2$$
$$c^2t^2 - v^2t^2 = c^2t_0^2$$
$$t^2\left[1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)\right] = t_0^2$$
$$t^2 = \frac{t_0^2}{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)}$$
$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$$



es el mismo factor usado por Lorentz para explicar la contracción de la longitud. Al inverso de esta cantidad se le conoce como *factor de Lorentz*, $\gamma$ (gamma minúscula griega); esto es,

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

Entonces, la ecuación de la dilatación del tiempo puede expresarse de manera más sencilla como:

$$t = \gamma t_0$$

Observa los términos en $\gamma$. Algo de jugueteo mental te mostrará que $\gamma$ siempre es mayor que 1 para cualquier rapidez $v$ mayor que 0. Observa que, debido a que la rapidez $v$ siempre es menor que $c$, la razón $v/c$ siempre es menor que 1; lo mismo sucede con $v^2/c^2$. ¿Puedes ver que, entonces, $\gamma$ es mayor que 1? Ahora considera el caso donde $v = 0$. Esta razón $v^2/c^2$ es 0, y, para rapideces cotidianas, donde $v$ es despreciable comparada con $c$, prácticamente es 0. Entonces, $1 - v^2/c^2$ tiene un valor de 1, al igual que lo tiene $\sqrt{1-v^2/c^2}$, lo cual hace $\gamma = 1$. Entonces se encuentra que $t = t_0$: los intervalos de tiempo parecen ser iguales en ambos marcos de referencia. Para rapideces mayores, $v/c$ está entre 0 y 1, y $1 - v^2/c^2$ es menor que 1; lo mismo sucede con $\sqrt{1-v^2/c^2}$. Esto hace que $\gamma$ sea mayor que 1, de modo que $t_0$ multiplicado por un factor mayor que 1 produce un valor mayor que $t_0$, una elongación, una dilatación del tiempo.

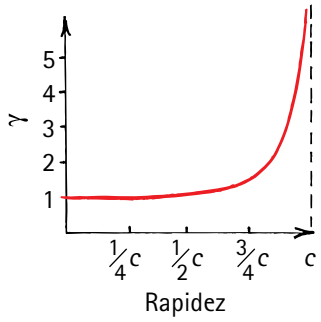



**FIGURA 35.11**
Gráfica del factor de Lorentz $\gamma$ como función de la rapidez.

Para considerar algunos valores numéricos, supón que $v$ es 50% de la rapidez de la luz. Entonces, se sustituye $0.5c$ por $v$ en la ecuación de dilatación del tiempo y, después de un poco de aritmética, se encuentra que $\gamma = 1.15$, de modo que $t = 1.15t_0$. Esto significa que, si examinaras un reloj en una nave espacial que viaja a la mitad de la rapidez de la luz, verías que el segundero tarda 1.15 minutos en hacer una revolución, mientras que un observador que viaje con el reloj descubriría que tarda 1 minuto. Si la nave espacial pasa junto a ti a 87% de la rapidez de la luz, $\gamma = 2$ y $t = 2t_0$. Medirías que los eventos temporales en la nave espacial tardan el doble que los intervalos habituales, porque las manecillas de un reloj en la nave girarían sólo la mitad de rápido que las de tu propio reloj. Los eventos en la nave parecerían tener lugar en cámara lenta. A 99.5% de la rapidez de la luz, $\gamma = 10$ y $t = 10t_0$; descubrirías que el segundero del reloj de la nave espacial tarda 10 minutos en recorrer una revolución que requiere 1 minuto en tu reloj.

La dilatación del tiempo *no* es una ilusión; es real. Para poner estas cifras de otra manera, a $0.995c$, el reloj en movimiento parecería funcionar a un décimo de tu tasa; haría tictac sólo 6 segundos mientras tu reloj haría tictac 60 segundos. A $0.87c$, el reloj en movimiento hace tictac a la mitad de la tasa y muestra 30 segundos en tus 60 segundos; a $0.50c$, el reloj en movimiento hace tictac a una razón de 1/1.15 y hace tictac 52 segundos en tus 60 segundos. Los relojes en movimiento corren lento.

**FIGURA 35.12**
Cuando estás en reposo, ves que la nave viaja con la máxima razón de cambio en el tiempo: 24 horas por día. Cuando viajas por el espacio a cerca de la razón máxima (la rapidez de la luz), ves que el tiempo de la nave prácticamente está quieto.

No hay nada raro en el reloj en movimiento en sí; tan sólo hace tictac al ritmo de un tiempo diferente. Cuanto más rápido se mueva el reloj, más lento parecerá funcionar visto por un observador que no se mueva con el reloj. Si fuera posible hacer que un reloj pasara volando junto a ti con la rapidez de la luz, el reloj no parecería funcionar en absoluto. Medirías que el intervalo entre tictacs sería infinito. ¡El reloj sería intemporal! Pero una cosa *sí* se mueve con la rapidez de la luz: la luz misma. De modo que los fotones nunca envejecen. No hay paso de tiempo para un fotón. Los fotones son verdaderamente intemporales.

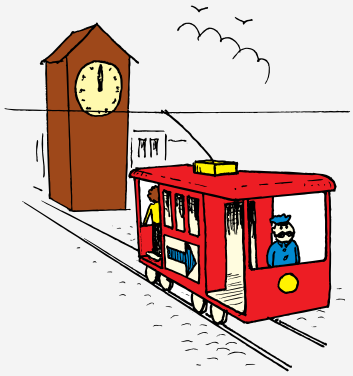
Si una persona que pasara muy aprisa junto a ti consultara un reloj en tu marco de referencia, descubriría que tu reloj funciona tan lento como verías que lo hace el suyo. Cada uno concluiría que el reloj del otro corre lento. En realidad no hay contradicción aquí, porque es físicamente imposible que dos observadores en movimiento relativo se refieran a uno y el mismo reino de espacio-tiempo. Las mediciones hechas en un reino del espacio-tiempo no necesitan coincidir con las mediciones hechas en otro reino del espacio-tiempo. Sin embargo, la medición en la que todos los observadores coinciden es la rapidez de la luz.

La dilatación del tiempo se ha confirmado en el laboratorio innumerables veces con aceleradores de partículas. Las vidas de las partículas radiactivas con movimiento

## LECTURA DEL TIEMPO DURANTE UN VIAJE EN TRANVÍA

Imagina que tú eres Einstein a comienzos del siglo XX y que viajas en un tranvía que se aleja de un enorme reloj en la plaza del pueblo. El reloj marca las 12 del mediodía. Expresar que marca las 12 del mediodía es decir que la luz que lleva la información "12 del mediodía" se refleja en el reloj y viaja hacia ti por tu línea de visión. Si de pronto mueves la cabeza a un lado, la luz que lleva la información, en lugar de llegar a tu ojo, pasa de largo, tal vez hacia el espacio. Ahí afuera, un observador que *más tarde* recibe la luz dice: "oh, ahora en la Tierra son las 12 del mediodía". Pero, desde tu punto de vista, ahora es más tarde. Tú y el observador distante ven las 12 del mediodía en momentos diferentes. Te preguntas más sobre esta idea. Si el tranvía viajara tan rápido como la luz, entonces el tranvía continuaría con la información de la luz que dice "las 12 del mediodía". Entonces, si viajas con la rapidez de la luz, siempre serán las 12 del mediodía en la plaza del pueblo. En otras palabras: ¡el tiempo en la plaza del pueblo se congela!

Si el tranvía no se mueve, ves que el reloj de la plaza del pueblo se mueve al futuro a la tasa de 60 s/min; si te mueves con la rapidez de la luz, ves que los segundos del reloj tardan un tiempo infinito. Éstos son los dos extremos. ¿Qué hay en medio? ¿Cómo se vería el avance de las manecillas del reloj mientras te mueves con rapideces menores que la rapidez de la luz?



Un poco de razonamiento te mostrará que recibirás el mensaje "la 1 de la tarde" en cualquier momento entre 60 minutos hasta un infinito de tiempo después de recibir el mensaje "las 12 del mediodía", dependiendo de cuál sea tu rapidez entre los extremos de cero y la rapidez de la luz. Desde tu marco de referencia de gran rapidez (pero menor que $c$), ves que todos los eventos que tienen lugar en el marco de referencia del reloj (que es la Tierra) ocurren en movimiento lento. Si inviertes la dirección y viajas con gran rapidez de vuelta hacia el reloj, verás que todos los eventos que tienen lugar en el marco de referencia del reloj aumentan su rapidez. Cuando regresas y te sientas de nuevo en la plaza, ¿los efectos de ir y venir se compensan entre sí? Sorprendentemente, ¡no! El tiempo se estirará. El reloj de pulsera que usas todo el tiempo y el reloj del poblado no coincidirán. Esto es la dilatación del tiempo.

rápido aumentan conforme su rapidez aumenta, y la cantidad de aumento es justo la que predice la ecuación de Einstein. La dilatación del tiempo se ha confirmado también para movimiento no tan rápido. En 1971, para poner a prueba la teoría de Einstein, cuatro relojes atómicos de cesio se pusieron a volar dos veces alrededor del mundo en aviones comerciales con horario regular, una vez hacia el este y otra vez hacia el oeste, para poner a prueba la teoría de la relatividad de Einstein con relojes macroscópicos. Los relojes indicaron diferentes tiempos después de sus viajes redondos. Con base en la escala de tiempo atómico del Observatorio Naval de Estados Unidos, las diferencias en tiempo observadas, en mil millonésimas de segundo, estuvieron en concordancia con la predicción de Einstein. En la actualidad, con relojes atómicos en órbita alrededor de la Tierra como parte del Sistema de Posicionamiento Global, los ajustes por los efectos de la dilatación del tiempo son esenciales para usar las señales provenientes de los relojes a fin de ubicar posiciones en la Tierra.

Todo esto parece muy extraño sólo porque no es una experiencia común lidiar con mediciones hechas a rapideces relativistas o mediciones del tipo reloj atómico a rapideces ordinarias. La teoría de la relatividad no es de sentido común. Pero el sentido común, de acuerdo con Einstein, es esa capa de prejuicios colocada en la mente antes de los 18 años de edad. Si hubieras pasado tu juventud viajando por el Universo en naves espaciales a gran rapidez, tal vez te sentirías cómodo con los resultados de la relatividad.

**pti**

- El Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) tiene en cuenta la dilatación del tiempo de los relojes atómicos en órbita. De otro modo, tu receptor GPS perdería tu posición, lo que sería muy grave.

### PUNTO DE CONTROL

1. **Si te movieras en una nave espacial a gran rapidez con respecto a la Tierra, ¿observarías alguna diferencia en tu pulso? ¿En el pulso de las personas en la Tierra?**
2. **¿Los observadores A y B estarán de acuerdo en las mediciones de tiempo si A se mueve a la mitad de la rapidez de la luz con respecto a B? ¿Si tanto A como B se mueven juntos con la mitad de la rapidez de la luz con respecto a la Tierra?**
3. **¿La dilatación del tiempo significa que el tiempo en realidad pasa más lento en los sistemas en movimiento o sólo que parece pasar más lento?**

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. No habría rapidez relativa entre tú y tu pulso porque los dos comparten el mismo marco de referencia. Por tanto, no observarías efectos relativistas en tu pulso. Sin embargo, habría un efecto relativista entre tú y las personas en la Tierra. Descubrirías que su pulso es más lento que lo normal (y ellos descubrirían que tu pulso es más lento que lo normal). Los efectos relativistas siempre se atribuyen al otro.
2. Cuando A y B se mueven uno con respecto al otro, cada uno observa que el tiempo transcurre más lento en el marco del otro. De modo que no están de acuerdo en las mediciones del tiempo. Cuando se mueven al unísono, comparten el mismo marco de referencia y están de acuerdo en las mediciones del tiempo. Cada uno ve que el tiempo del otro transcurre de manera normal, y cada uno ve los eventos en la Tierra en el mismo movimiento lento.
3. Que el tiempo transcurra más lento en los sistemas en movimiento no es sólo una ilusión derivada del movimiento. El tiempo en realidad pasa más lento en un sistema en movimiento con respecto a uno en reposo relativo, como verás en la siguiente sección. ¡Sigue leyendo!

## El viaje del gemelo

Una ilustración espectacular de la dilatación del tiempo la ofrecen dos gemelos idénticos, uno es un astronauta que realiza un viaje redondo a gran rapidez en la galaxia mientras el otro permanece en casa en la Tierra. Cuando el gemelo viajero regresa, es más joven que el gemelo que se quedó en casa. Cuánto más joven depende de las rapideces relativas implicadas. Si el gemelo viajero mantiene una rapidez de 50% de la rapidez de la luz durante 1 año (de acuerdo con los relojes a bordo de la nave), en la Tierra habrán transcurrido 1.15 años. Si el gemelo viajero mantiene una rapidez de 87% de la rapidez de la luz durante un año, entonces en la Tierra habrán transcurrido 2 años. A 99.5% de la rapidez de la luz, 10 años terrestres transcurrirían en un año de la nave espacial. Con esta rapidez, el gemelo viajero envejecería un solo año mientras el gemelo que se quedó en casa envejecería 10 años.

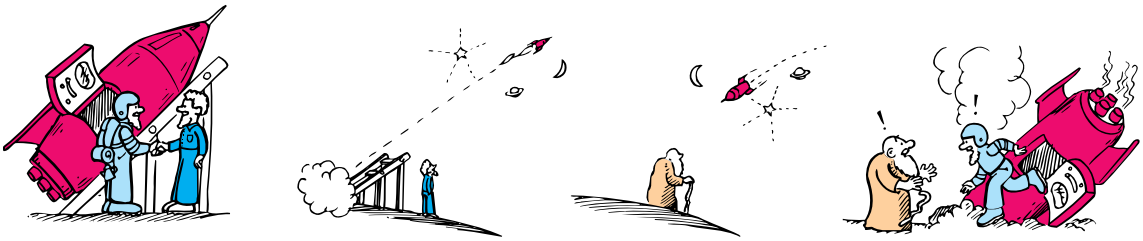


**FIGURA 35.13**
El gemelo viajero no envejece tan rápido como el gemelo que se queda en casa.

**pti**

- El cosmonauta Sergei Avdeyev pasó más de dos años en órbita terrestre en la nave espacial *Mir* y, debido a la dilatación del tiempo, ¡él es hoy dos centésimas de segundo más joven de lo que sería si nunca hubiera estado en el espacio!

Con frecuencia surge una pregunta: dado que el movimiento es relativo, ¿por qué el efecto no funciona igual de bien a la inversa? ¿Por qué cuando el gemelo viajero regresara no encontraría a su gemelo en casa más joven que él mismo? Se demostrará que, desde los marcos de referencia tanto del gemelo en la Tierra como del gemelo viajero, es el gemelo en la Tierra quien envejece más. Primero, piensa en una nave espacial que flota en reposo con respecto a la Tierra. Supón que la nave envía al planeta breves destellos de luz a espacios regulares (Figura 35.14). Transcurrirá un tiempo determinado antes de que los destellos lleguen al planeta, tal como transcurren 8 minutos antes de que la luz solar llegue a la Tierra. Los destellos de luz encontrarán al receptor en el planeta con la rapidez $c$. Debido a que no hay movimiento relativo entre el emisor y el receptor, los destellos sucesivos se recibirán con la frecuencia con la que se envíen. Por ejemplo, si un destello se envía desde la nave cada 6 minutos, entonces, después de cierta demora inicial, el receptor recibirá un destello cada 6 minutos. Sin movimiento de por medio, no hay nada raro en esto.

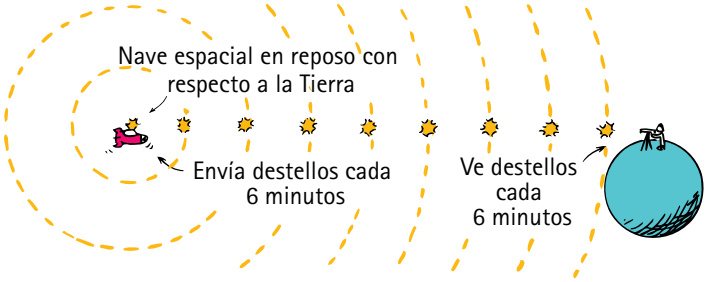



**FIGURA 35.14**
Cuando no hay movimiento de por medio, los destellos de luz se reciben con la frecuencia con la que la nave espacial los envía.

Cuando hay movimiento de por medio, la situación es muy diferente. Es importante observar que la rapidez de los destellos todavía será *c*, sin importar cómo se muevan la nave espacial o el receptor. Sin embargo, la frecuencia con la que se ven los destellos depende mucho del movimiento relativo implicado. Cuando la nave viaja hacia el receptor, éste ve los destellos con más frecuencia. Esto ocurre no sólo porque el tiempo se altera por el movimiento, sino principalmente porque cada destello sucesivo tiene menos distancia que recorrer a medida que la nave se acerca al receptor. Si la nave emite un destello cada 6 minutos, los destellos se verán a intervalos de menos de 6 minutos. Supón que la nave viaja tan rápido como para que los destellos se vean con el doble de frecuencia. Entonces se ven a intervalos de 3 minutos (Figura 35.15).

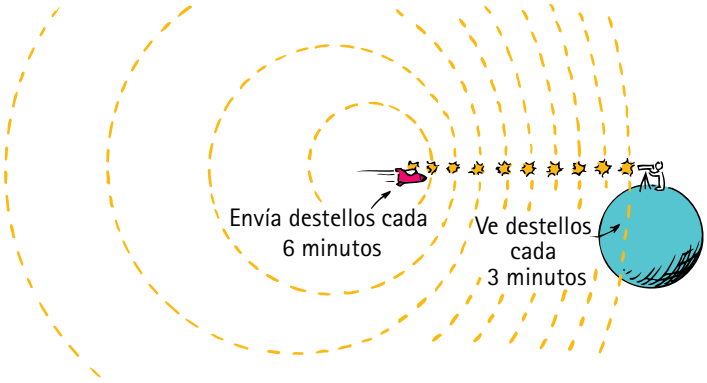



**FIGURA 35.15**
Cuando el emisor se mueve hacia el receptor, los destellos se ven con más frecuencia.

Si la nave se aleja del receptor con la misma rapidez y todavía emite destellos a intervalos de 6 minutos, el receptor verá estos destellos con la mitad de la frecuencia; esto es, a intervalos de 12 minutos (Figura 35.16). Esto se debe principalmente a que cada destello sucesivo tiene que recorrer mayor distancia a medida que la nave se aleja del receptor.

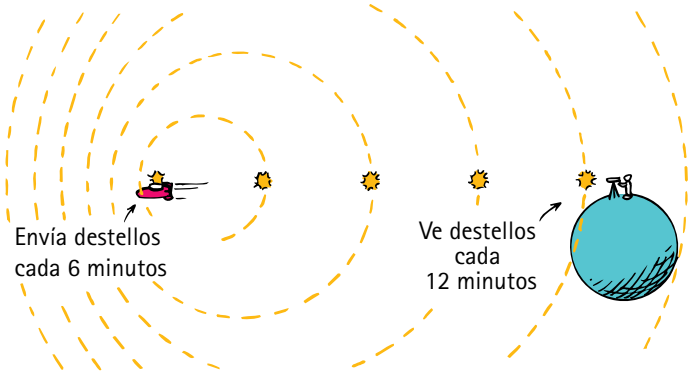



**FIGURA 35.16**
Cuando el emisor se aleja del receptor, los destellos están más espaciados y se ven con menos frecuencia.

El efecto de alejarse es exactamente el opuesto de acercarse al receptor. De modo que si los destellos se reciben con el doble de frecuencia cuando la nave espacial se aproxima (los intervalos de destellos de 6 minutos se ven cada 3 minutos), se reciben a la mitad de la frecuencia cuando se aleja (los intervalos de destellos de 6 minutos se ven cada 12 minutos).[2]

Esto significa que si dos eventos están separados por 6 minutos de acuerdo con el reloj de la nave espacial, los destellos se verán separados por 12 minutos cuando la nave espacial se aleje y por 3 minutos cuando la nave se aproxime.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **Si la nave espacial emite una señal inicial "de salida", seguida de un destello cada 6 minutos durante una hora, ¿cuántos destellos emitirá?**
2. **La nave envía destellos igualmente espaciados cada 6 minutos mientras se aproxima al receptor con rapidez constante. ¿Estos destellos estarán igualmente espaciados cuando encuentren al receptor?**
3. **Si el receptor ve estos destellos a intervalos de 3 minutos, ¿cuánto tiempo transcurrirá entre la señal inicial y el último destello (en el marco de referencia del receptor)?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. La nave emitirá un total de 10 destellos en 1 h porque (60 min)/(6 min) = 10 (11, si cuentas la señal inicial).
2. Sí. Siempre y cuando la nave se mueva con rapidez constante, los destellos igualmente espaciados se verán igualmente espaciados, pero con más frecuencia. (Si la nave acelerara mientras envía los destellos, entonces los destellos no se verían a intervalos igualmente espaciados.)
3. Treinta minutos, porque los 10 destellos llegan cada 3 min.

Aplica esta duplicación y reducción a la mitad de los intervalos de destellos a los gemelos. Supón que el gemelo viajero se aleja del gemelo en la Tierra con la misma gran rapidez durante 1 hora y luego rápido da la vuelta y regresa en 1 hora. Sigue esta línea de razonamiento con ayuda de la Figura 35.17. El gemelo viajero hace un viaje redondo de 2 horas, de acuerdo con todos los relojes a bordo de la nave espacial. Sin embargo, desde el marco de referencia de la Tierra, no se verá que este viaje dure 2 horas. Puedes ver esto con la ayuda de los destellos provenientes del reloj de luz de la nave.

[2]Esta relación recíproca (reducción a la mitad y duplicación de frecuencias) es una consecuencia de la constancia de la rapidez de la luz y puede ilustrarse con un ejemplo. Supón que un emisor en la Tierra emite destellos separados 3 minutos hacia un observador distante en un planeta que esté en reposo en relación con la Tierra. Entonces, el observador ve destellos cada 3 min. Ahora, supón que un segundo observador viaja en una nave espacial entre la Tierra y el planeta con una rapidez tan alta que le permite ver los destellos con la mitad de frecuencia: separados 6 min. Esta reducción a la mitad en la frecuencia ocurre para una rapidez de alejamiento de 0.6*c*. Puedes ver que la frecuencia se duplicará para una rapidez de aproximación de 0.6*c* si supones que la nave espacial emite su propio destello cada vez que observa un destello terrestre; esto es, cada 6 min. ¿Cómo ve estos destellos el observador en el planeta distante? Dado que los destellos terrestres y los destellos de la nave espacial viajan juntos con la misma rapidez, *c*, el observador verá no sólo los destellos terrestres cada 3 min, sino también los destellos de la nave cada 3 min. De este modo, aunque una persona en la nave espacial emita destellos cada 6 min, el observador los observa cada 3 min, al doble de la frecuencia de emisión. En el caso de una rapidez de retroceso donde la frecuencia parece reducida a la mitad, la frecuencia parece duplicada por la misma rapidez de aproximación. Si la nave viajara más rápido, de modo que la frecuencia de recesión fuese 1/3 o 1/4, entonces la frecuencia de aproximación se triplicaría o cuadruplicaría, respectivamente. Esta relación recíproca no se sostiene con las ondas que necesitan un medio. En el caso de las ondas sonoras, por ejemplo, una rapidez que resulte en una duplicación de la frecuencia de emisión en la aproximación produce 2/3 (no 1/2) de la frecuencia de emisión en el alejamiento. De modo que el efecto Doppler relativista difiere del que se experimenta con el sonido.

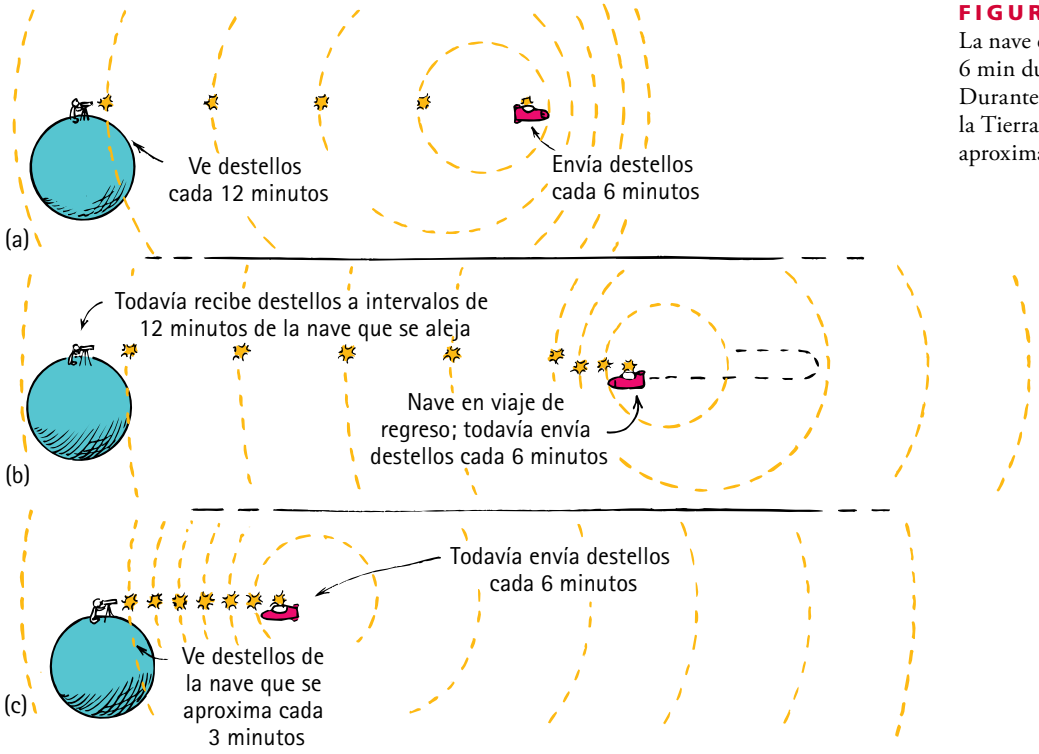



**FIGURA 35.17**
La nave espacial emite destellos cada 6 min durante un viaje de 2 horas. Durante la primera hora, se aleja de la Tierra. Durante la segunda hora, se aproxima a la Tierra.

A medida que la nave se aleja de la Tierra, emite un destello de luz cada 6 minutos. Estos destellos se reciben en la Tierra cada 12 minutos. Durante la hora de alejamiento de la Tierra, se emiten un total de 10 destellos (después de la señal "de salida"). Si la nave parte de la Tierra a mediodía, los relojes a bordo de la nave marcan 1:00 p.m. cuando se emite el décimo destello. ¿Qué hora será en la Tierra cuando este décimo destello llegue a la Tierra? La respuesta es 2:00 p.m. ¿Por qué? Porque el tiempo que la Tierra tarda en recibir 10 destellos a intervalos de 12 minutos es $10 \times (12 \text{ min})$, o 120 min (= 2 h).

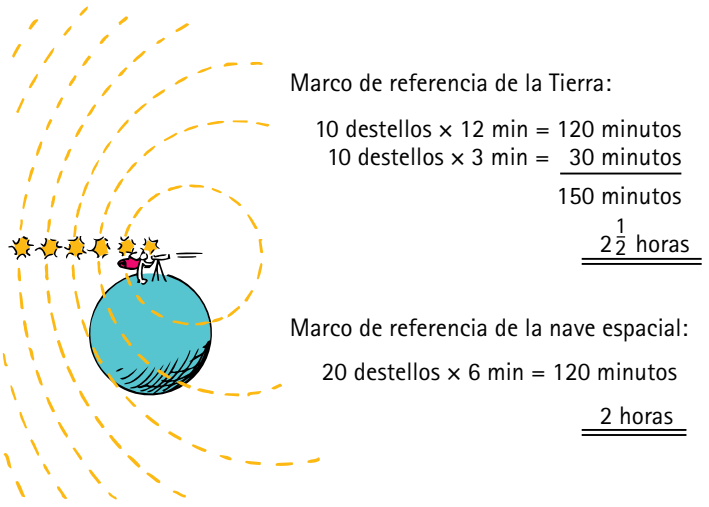



**FIGURA 35.18**
El viaje que tarda 2 h en el marco de referencia de la nave espacial tarda 2½ h en el marco de referencia de la Tierra.

Supón que la nave espacial de algún modo puede dar la vuelta "en ángulo cerrado" (en un tiempo tan corto que sea despreciable) y regresa con la misma rapidez alta. Durante la hora de regreso, emite 10 destellos más a intervalos de 6 min. Estos destellos se reciben cada 3 minutos en la Tierra, de modo que los 10 destellos llegan en 30 minutos. Un reloj en la Tierra marcará 2:30 p.m. cuando la nave espacial complete su viaje de 2 horas. ¡Puedes ver que el gemelo terrestre envejeció media hora más que el gemelo a bordo de la nave espacial!

El resultado es el mismo desde cualquier marco de referencia. Piensa de nuevo en el mismo viaje, sólo que esta vez con destellos emitidos desde la Tierra a intervalos regulares de 6 minutos de acuerdo con el tiempo en la Tierra. Desde el marco de referencia de la nave espacial que se aleja, estos destellos se reciben a intervalos de 12 minutos (Figura 35.19a). Esto significa que la nave espacial ve 5 destellos durante la hora que se aleja de la Tierra. Durante la hora de aproximación de la nave espacial, los destellos de luz se ven a intervalos de 3 minutos (Figura 35.19b), de modo que se verán 20 destellos.

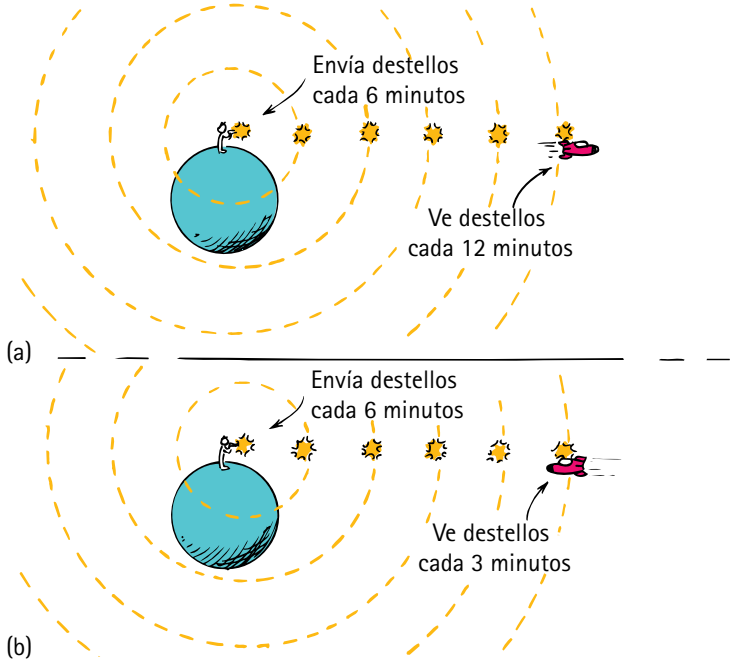



**FIGURA 35.19**
Los destellos enviados desde la Tierra a intervalos de 6 min se ven a intervalos de 12 min en la nave cuando ésta se aleja y a intervalos de 3 min cuando se aproxima.

Así que, puedes ver que la nave espacial recibe un total de 25 destellos durante su viaje de 2 horas. Sin embargo, de acuerdo con los relojes en la Tierra, el tiempo que tardó en emitir los 25 destellos a intervalos de 6 minutos fue 25 × (6 min), o 150 min (= 2½ h). Esto se muestra en la Figura 35.20.

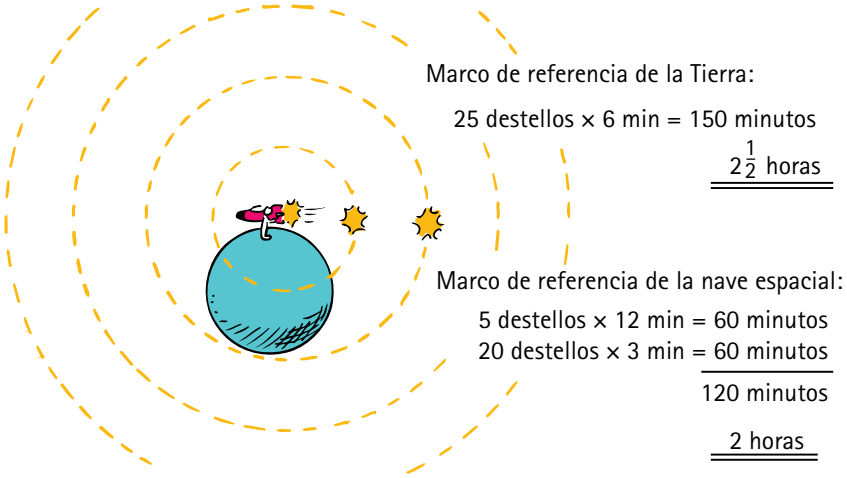



**FIGURA 35.20**
Un intervalo de tiempo de 2½ h en la Tierra se ve que tarda 2 h en el marco de referencia de la nave espacial.

De modo que los gemelos están de acuerdo en los mismos resultados, sin discutir sobre quién envejece más. Mientras que el gemelo terrestre permanece en un solo marco de referencia, el gemelo viajero experimentó dos marcos de referencia diferentes, separados por la aceleración de la nave espacial al dar la vuelta. La nave espacial en efecto experimentó dos reinos de tiempo diferentes, mientras que la Tierra experimentó otro reino de tiempo distinto de los anteriores, pero uno solo. Los gemelos pueden reunirse de nuevo en el mismo lugar en el espacio sólo a expensas del tiempo.

**PUNTO DE CONTROL**

**Dado que el movimiento es relativo, ¿no puede decirse también que la nave espacial está en reposo y la Tierra se mueve, en cuyo caso el gemelo en la nave espacial envejece más?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

No, no a menos que la Tierra dé la vuelta y regrese, como hizo la nave espacial en el ejemplo del viaje del gemelo. La situación no es simétrica porque un gemelo permanece en un solo marco de referencia en el espacio-tiempo durante el viaje, mientras el otro hace un cambio evidente de marco de referencia, como lo demuestra la aceleración al dar la vuelta.

## 35.5 Suma de velocidades

**SCREENCAST: Velocidades relativistas**

La mayoría de las personas sabe que si caminas a 1 km/h por el pasillo de un tren que se mueve a 60 km/h, tu rapidez en relación con el suelo es 61 km/h si caminas en la misma dirección en que se mueve el tren y 59 km/h si caminas en la dirección contraria. Lo que la mayoría de las personas sabe es *casi* correcto. Cuando se tiene en cuenta la relatividad especial, las rapideces son *muy cercanas* a 61 km/h y 59 km/h, respectivamente.

En el caso de los objetos cotidianos en movimiento uniforme (no acelerado), lo habitual es combinar las velocidades mediante la regla simple:

$$V = v_1 + v_2$$

Pero esta regla no se aplica a la luz, que siempre tiene la misma rapidez, $c$. En términos estrictos, la regla anterior es una aproximación de la regla relativista para la suma de velocidades. Aquí no se abordará la larga derivación, sino que sólo se presentará la regla:

$$V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \dfrac{v_1 v_2}{c^2}}$$

El numerador de esta fórmula es de sentido común. Pero esta simple suma de dos velocidades se altera por el segundo término en el denominador, que es significativo sólo cuando tanto $v_1$ como $v_2$ son casi $c$.

Como ejemplo, piensa en una nave espacial que se aleja de ti a una velocidad de $0.5c$. Dispara un cohete que empuja en la misma dirección y también se aleja de ti con una rapidez de $0.5c$ con respecto a sí misma. ¿Qué tan rápido se mueve el cohete en relación a ti? La regla no relativista diría que el cohete se mueve con la rapidez de la luz en tu marco de referencia. Pero, de hecho,

$$V = \frac{0.5c + 0.5c}{1 + \dfrac{0.25c^2}{c^2}} = \frac{c}{1.25} = 0.8c$$

lo que ilustra otra consecuencia de la relatividad: ningún objeto material puede viajar tan rápido como la luz, ni más rápido.

Supón que la nave espacial en vez de ello dispara un pulso de luz láser en la dirección de su viaje. ¿Qué tan rápido se mueve el pulso en tu marco de referencia?

$$V = \frac{0.5c + c}{1 + \dfrac{0.5c^2}{c^2}} = \frac{1.5c}{1.5} = c$$

Sin importar cuáles sean las velocidades relativas entre los dos marcos, la luz que se mueve a $c$ en un marco, se verá moverse a $c$ en cualquier otro marco. Si intentas seguir la luz, nunca podrás atraparla.

**FIGURA 35.21**
Desde el marco de referencia de la Tierra, la luz tarda 25,000 años en viajar del centro de la Vía Láctea al sistema solar. Desde el marco de referencia de una nave espacial a gran rapidez que vuela del centro galáctico a la Tierra, el viaje tarda menos tiempo. Si un marco de referencia pudiera unirse a la luz misma, el tiempo de viaje podría reducirse a cero.

## Viaje espacial

Uno de los antiguos argumentos contra la posibilidad de que el ser humano realizara un viaje interestelar era que la vida es muy corta. Se argumentaba, por ejemplo, que la estrella más cercana a la Tierra (después del Sol), Alpha Centauri, está a 4 años-luz de distancia, y un viaje redondo, incluso a la rapidez de la luz, requeriría 8 años.[3] E incluso para un viaje a la rapidez de la luz al centro de la galaxia, a 25,000 años-luz de distancia, se necesitarían 25,000 años. Pero estos argumentos no tienen en cuenta la dilatación del tiempo. El tiempo para una persona en la Tierra y el tiempo para una persona en una nave espacial con gran rapidez no son lo mismo.

El corazón de una persona late al ritmo del reino de espacio-tiempo en el que se encuentra. Y un reino de espacio-tiempo parece igual que cualquier otro para el corazón, pero no para un observador que se encuentra fuera del marco de referencia del corazón. Por ejemplo, los astronautas que viajen a 99% de $c$ podrían llegar a la estrella Procyon (a 10.4 años-luz de distancia) y regresar en 21 años terrestres. Sin embargo, debido a la dilatación del tiempo, sólo transcurrirían 3 años para los astronautas. Esto es lo que todos sus relojes les dirían, y, en términos biológicos, sólo habrían envejecido 3 años. ¡Los oficiales espaciales que les dieran la bienvenida a su regreso serían quienes habrían envejecido 21 años!

A rapideces mayores, los resultados incluso son más impresionantes. Con una rapidez de 99.99% de $c$, los viajeros podrían recorrer una distancia de un poco más de 70 años-luz en un solo año de su tiempo; a 99.999% de $c$, esta distancia aumentaría a mucho más de 200 años-luz. ¡Un viaje de 5 años para ellos los llevaría más lejos de lo que la luz viaja en 1,000 años en el tiempo de la Tierra!

La tecnología actual no permite tales travesías. Conseguir suficiente energía de propulsión y protección contra la radiación son ambos problemas prohibitivos. Las naves espaciales que viajaran con rapideces relativistas necesitarían miles de millones de veces la energía utilizada para poner en órbita un transbordador espacial. Incluso algún tipo de estatorreactor interestelar que recogiera gas hidrógeno interestelar para quemar en un reactor de fusión tendría que superar el enorme efecto retardador de recoger el hidrógeno a grandes rapideces. Y los viajeros espaciales se toparían con partículas interestelares como si tuvieran un gran acelerador de partículas apuntando hacia ellos. En la actualidad no se conoce ninguna forma de protección contra un bombardeo tan intenso de partículas durante periodos prolongados. Por el momento, el viaje espacial interestelar debe relegarse a la ciencia ficción, no porque haya una teoría científica que lo impida, sino tan sólo por la impracticabilidad del viaje espacial. Viajar cerca de la rapidez de la luz con la finalidad de aprovechar la dilatación del tiempo es por completo congruente con las leyes de la física.

Puedes mirar el pasado, pero no puedes ir al pasado. Por ejemplo, el pasado se experimenta cuando ves los cielos nocturnos. La luz de las estrellas que llega a tus ojos salió de dichas estrellas hace docenas, cientos, incluso millones de años. Lo que ves son las estrellas como eran hace mucho tiempo. Por tanto, eres testigo ocular de la historia antigua, y sólo puedes especular sobre lo que pudo ocurrir a las estrellas entretanto.

Si observas la luz que salió de una estrella, por decir, hace 100 años, entonces se deduce que cualquier ser dotado del sentido de la vista en dicho sistema solar te ve a ti con la luz que salió de *aquí* hace 100 años y que, además, si tiene supertelescopios, bien puede ser testigo ocular de los eventos terrestres ocurridos hace un siglo, las secuelas de la Guerra de Secesión estadounidense, por ejemplo. Vería tu pasado, pero también vería eventos en una dirección hacia adelante; vería tu reloj correr en el sentido de las manecillas del reloj.

Puedes especular sobre la posibilidad de que el tiempo también se mueva contra las manecillas del reloj hacia el pasado, así como en el sentido de las manecillas hacia el futuro. Podrías preguntar: ¿por qué en el espacio puedes moverte hacia adelante o hacia atrás, hacia la izquierda o la derecha, hacia arriba o hacia abajo, pero sólo puedes moverte en una dirección en el tiempo? Es muy interesante que las matemáticas de las interacciones de las partículas elementales permitan la "inversión del tiempo", aunque existen algunas interacciones de partículas que favorecen un poco una dirección en el tiempo. Las partículas hipotéticas que podrían moverse

[3]Un año-luz es la distancia que recorre la luz en 1 año, $9.46 \times 10^{12}$ km.

## SALTOS CENTENARIOS

Lleva la ciencia ficción hacia un posible tiempo en el futuro en el que los problemas de los suministros de energía y la radiación hayan sido superados y que los viajes espaciales sean habituales. Las personas tendrán la opción de hacer un viaje y regresar a cualquier siglo futuro de su elección. Por ejemplo, uno podría partir de la Tierra en una nave espacial de gran rapidez en el año 2100, viajar durante 5 años más o menos, y regresar en el año 2500. Uno podría vivir entre los terrícolas de dicho periodo durante un rato y partir de nuevo para probar el año 3000.

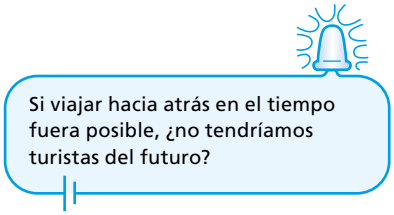
Las personas podrían seguir saltando hacia el futuro un poco a expensas de su propio tiempo, pero no podrían viajar al pasado. Nunca podrían regresar a la misma era en la Tierra de la cual se hubieran despedido. El tiempo, como se le conoce, viaja en una dirección: hacia adelante. Aquí en la Tierra, te mueves constantemente hacia el futuro a la tasa estable de 24 horas al día. Un astronauta que parte en un viaje a las profundidades del espacio debe vivir con el hecho de que, al regresar, habrá transcurrido mucho más tiempo en la Tierra del que el astronauta haya experimentado, subjetiva y psicológicamente, durante el viaje. El credo de todos los viajeros estelares, sin importar su condición fisiológica, será el adiós permanente.

más rápido que la luz y hacia atrás en el tiempo se denominan *taquiones*. En cualquier caso, para el complejo organismo denominado ser humano, el tiempo sólo tiene una dirección.[4]

Esta conclusión se ignora despreocupadamente en un poema jocoso que es uno de los favoritos de los científicos:

> Había una jovencita llamada Brillante
> Quien viajó mucho más rápido que la luz.
> Partió un día
> En una forma relativa
> Y regresó la noche anterior.

Incluso con la mente bien metida en la relatividad, de un modo inconsciente todavía podrías aferrarte a la idea de que existe un tiempo absoluto y comparar todos estos efectos relativistas con él: reconocer que el tiempo cambia de esta forma y de esa otra, para esta rapidez y para esa otra, y aun así sentir que existe un tiempo básico o absoluto. Puedes tender a creer que el tiempo que experimentas en la Tierra es fundamental y que los otros tiempos no lo son. Esto es comprensible: eres terrícola. Pero la idea es limitante. Desde el punto de vista de los observadores en alguna otra parte del Universo, puedes estarte moviendo a rapideces relativistas; ellos ven que vives en cámara lenta. Pueden ver que vives una vida cientos de veces más larga que la de ellos, como con supertelescopios los verías a ellos vivir vidas cientos de veces más largas que la tuya. No hay un tiempo universalmente estándar; ninguno.




Uno piensa en el tiempo y luego en el Universo. Uno piensa en el Universo y se pregunta qué sucedió antes de que el Universo comenzara. Se pregunta qué ocurrirá si el Universo deja de existir en el tiempo. Pero el concepto de tiempo se aplica a eventos y entidades dentro del Universo, no a éste en su conjunto. El tiempo está "en" el Universo; el Universo no está "en" el tiempo. Sin el Universo, no hay tiempo —no hay antes, no hay después—. Del mismo modo, el espacio está "en" el Universo; el Universo no está "en" una región del espacio. No hay espacio "fuera" del Universo. El espacio-tiempo existe dentro del Universo. ¡Piensa en eso![5]

## 35.6 Contracción de la longitud

Conforme los objetos se mueven por el espacio-tiempo, tanto el espacio como el tiempo cambian. En resumen, el espacio se contrae, lo que hace que los objetos parezcan más pequeños cuando pasan junto a ti con rapideces relativistas. Esta **contracción**

SCREENCAST: Contracción de la longitud

[4]Se ha especulado que, si uno retrocediera en el tiempo, uno no lo sabría, ¡porque entonces recordaría el futuro y pensaría que éste fue su pasado!

[5]Algunos físicos plantean la hipótesis de que el Universo es sólo uno de muchos universos coexistentes denominados en conjunto "el multiverso" (o "el megaverso"). Sin embargo, todavía no hay evidencia de la existencia de tales "universos paralelos".

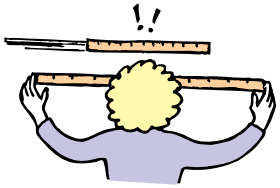


**FIGURA 35.22**
La contracción de Lorentz. El metro mide la mitad de largo cuando viaja a 87% de la rapidez de la luz con respecto al observador.

**de la longitud** la propuso por primera vez el físico George F. FitzGerald y la expresó matemáticamente otro físico, Hendrik A. Lorentz (mencionado antes). Mientras estos físicos planteaban la hipótesis de que la materia se contrae, Einstein vio que lo que se contrae es el espacio en sí. No obstante, puesto que la fórmula de Einstein es la misma que la de Lorentz, a este efecto se le llama *contracción de Lorentz*:

$$L = L_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

donde $v$ es la velocidad relativa entre el objeto observado y el observador, $c$ es la rapidez de la luz, $L$ es la longitud medida del objeto en movimiento y $L_0$ es la longitud medida del objeto en reposo.[6]

Supón que un objeto está en reposo de modo que $v = 0$. Cuando se sustituye $v = 0$ en la ecuación de Lorentz, se encuentra que $L = L_0$, como se esperaría. Cuando se sustituyen varios valores grandes de $v$ en la ecuación de Lorentz, comienzas a ver que el $L$ calculado se hace cada vez más pequeño. A 87% de $c$, un objeto se contraería a la mitad de su longitud original. A 99.5% de $c$, se contraería a un décimo de su longitud original. Si el objeto de alguna forma pudiera moverse a $c$, su longitud sería cero. Ésta es una de las razones por las que se dice que la rapidez de la luz es el límite superior de la rapidez de cualquier objeto en movimiento. Otra jocosa quintilla popular entre los científicos es ésta:

Había un joven esgrimista llamado Fisk,
Cuyo embate era excesivamente rápido.
Tan rápida era su acción
Que la contracción de Lorentz
Redujo su florete a un disco.

Dilatación del tiempo: los relojes en movimiento corren más lento. Contracción de la longitud: los objetos en movimiento son más pequeños (en la dirección de movimiento).

Como indica la Figura 35.23, la contracción tiene lugar sólo en la dirección del movimiento. Si un objeto se mueve en sentido horizontal, ninguna contracción tiene lugar en sentido vertical.

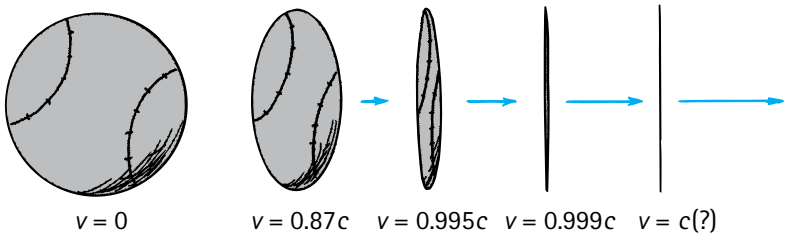



**FIGURA 35.23**
Con la rapidez, la longitud en la dirección del movimiento disminuye. Las longitudes en la dirección perpendicular no cambian.

La contracción de la longitud debe ser de considerable interés para los viajeros espaciales. El centro de la Vía Láctea está a 25,000 años-luz de distancia. ¿Esto significa que si viajas en dicha dirección con la rapidez de la luz, tardarías 25,000 años en llegar ahí? Desde un marco de referencia en la Tierra, sí; pero para los viajeros espaciales, ¡decididamente, no! A la rapidez de la luz, la distancia de 25,000 años-luz se contraería a ninguna distancia en absoluto. ¡Los imaginarios viajeros espaciales llegarían ahí al instante!

En el caso de los hipotéticos viajes a rapideces cercanas a la rapidez de la luz, la contracción de la longitud y la dilatación del tiempo son sólo dos caras del mismo fenómeno. Si los astronautas van tan rápido que descubren que la distancia a la estrella más cercana está a sólo 1 año-luz en lugar de los 4 años-luz medidos desde la Tierra, hacen el viaje en un poco más de 1 año. Pero los observadores en la Tierra dicen que los relojes a bordo de la nave espacial son tan lentos que sólo registran 1 año en 4 años del tiempo terrestre. Ambos están de acuerdo en lo que ocurre: los astronautas sólo envejecen por

[6]Esto se puede expresar como $L = \frac{1}{\gamma}L_0$, donde $\frac{1}{\gamma}$ siempre es 1 o menos (porque $\gamma$ siempre es 1 o mayor). Observa que no se explica cómo se derivan la ecuación de la contracción de la longitud o cualquier otra ecuación. Sólo se enuncian las ecuaciones como "guías de razonamiento" sobre las ideas de la relatividad especial.

poco más de un año cuando llegan a la estrella. Un conjunto de observadores dice que eso se debe a la contracción de la longitud; el otro conjunto dice que se debe a la dilatación del tiempo. Ambos tienen razón.

Si los viajeros espaciales alguna vez pudieran impulsarse a rapideces relativistas, encontrarían que las partes distantes del Universo se acercan más por la contracción del espacio, mientras que los observadores en la Tierra verían que los astronautas cubrirían una mayor distancia porque envejecerían más lento.

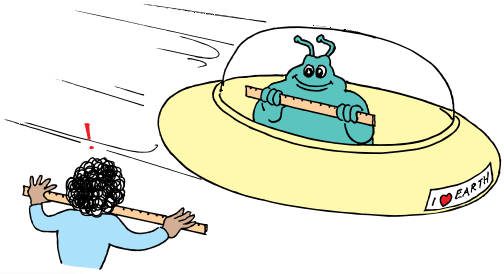



**FIGURA 35.24**
En el marco de referencia de tu metro, su longitud es 1 m. Los observadores en un marco de referencia en movimiento ven *tu* metro contraído, mientras tú ves *su* metro contraído. Los efectos de la relatividad siempre se atribuyen al otro individuo.

**PUNTO DE CONTROL**

**Un cartel rectangular en el espacio tiene las dimensiones 10 m × 20 m. ¿Qué tan rápido, y en qué dirección con respecto al letrero, un viajero espacial tendría que pasar para que el cartel se viera cuadrado?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

El viajero espacial tendría que viajar a 0.87*c* en una dirección paralela al lado más largo del cartel.

## 35.7 Cantidad de movimiento relativista

Recuerda el estudio de la cantidad de movimiento en el Capítulo 6. Aprendiste que el cambio en la cantidad de movimiento $mv$ de un objeto es igual al impulso $Ft$ que se le aplica: $Ft = \Delta mv$, o $Ft = \Delta p$, donde $p = mv$. Si aplicas más impulso a un objeto que tiene libertad para moverse, el objeto adquiere más cantidad de movimiento. Duplica el impulso y la cantidad de movimiento se duplica. Aplica 10 veces el impulso y el objeto gana 10 veces más cantidad de movimiento. ¿Esto significa que la cantidad de movimiento puede aumentar sin ningún límite? La respuesta es *sí*. ¿Esto significa que la rapidez también puede aumentar sin ningún límite? ¡La respuesta es *no*! El límite de rapidez de la naturaleza para los objetos materiales es *c*.

Para Newton, una cantidad de movimiento infinita significaría una masa infinita o una rapidez infinita. Pero no es así en la relatividad. Einstein demostró que se necesitaba una nueva definición de cantidad de movimiento. Ésta es:

$$p = \gamma mv$$

donde $\gamma$ es el factor de Lorentz (recuerda que $\gamma$ siempre es 1 o mayor). Esta definición generalizada de la cantidad de movimiento es válida en todos los marcos de referencia que se mueven de manera uniforme. La *cantidad de movimiento relativista* es mayor que $mv$ por un factor de $\gamma$. Para rapideces cotidianas mucho menores que $c$, $\gamma$ es casi igual a 1, de modo que $p$ es casi igual a $mv$. La definición de Newton de la cantidad de movimiento es válida para rapideces bajas. A rapideces más altas, $\gamma$ crece de manera impresionante, e igual lo hace la cantidad de movimiento relativista. Conforme la rapidez tiende a $c$, ¡$\gamma$ tiende al infinito! Sin importar cuán cerca de $c$ se empuje un objeto, éste todavía necesitaría un impulso infinito para darle la última pizca de rapidez necesaria para alcanzar $c$ —evidentemente imposible—. En consecuencia, se ve que ningún cuerpo con masa puede ser empujado a la rapidez de la luz, mucho menos por encima de ella.

Lo habitual es que las partículas subatómicas sean empujadas hasta casi alcanzar la rapidez de la luz. Las cantidades de movimiento de tales partículas pueden ser miles de veces mayores de lo que predice la expresión newtoniana. De manera clásica, las partículas se comportan como si sus masas aumentaran con la rapidez. Einstein en un inicio apoyó esta interpretación y luego cambió de parecer para mantener constante la masa, una propiedad de la materia que es la misma en todos los marcos de referencia. De modo que es $\gamma$ la que cambia con la rapidez, no la masa. El aumento de la cantidad de movimiento de una partícula a gran rapidez es evidente en el aumento de la "rigidez" de su trayectoria. Mientras más cantidad de movimiento tenga, más "rígida" es su trayectoria y es más difícil desviarla.

**FIGURA 35.25**
El Acelerador Lineal de Stanford mide 3.2 km de largo. Pero para los electrones que se mueven a través de él a 0.99999999995*c*, el acelerador mide sólo 3.2 cm de largo. Los electrones comienzan su viaje en el primer plano de la imagen y chocan contra objetivos, o de lo contrario se estudian, en las áreas experimentales que están al otro lado de la autopista (cerca de la parte superior de la fotografía).

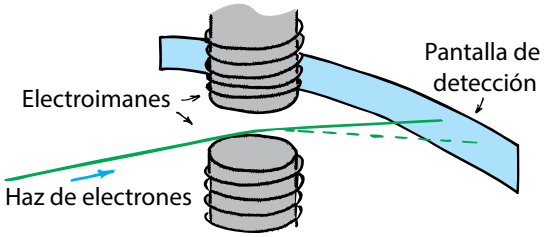



**FIGURA 35.26**
Si la cantidad de movimiento de los electrones fuera igual al valor newtoniano $mv$, el haz seguiría la línea punteada. Pero, dado que la cantidad de movimiento relativista $\gamma mv$ es mayor, el haz sigue la trayectoria "más rígida" que se muestra con la línea sólida.

Esto se observa cuando un haz de electrones se dirige hacia un campo magnético. Las partículas cargadas que se mueven en un campo magnético experimentan una fuerza que las desvía de sus trayectorias normales. Para una cantidad de movimiento pequeña, la trayectoria se curva de manera notoria. Para una cantidad de movimiento grande, hay mayor rigidez y la trayectoria se dobla menos (Figura 35.26). Aun cuando una partícula pueda moverse sólo un poco más rápido que otra (por decir, 99.9% de la rapidez de la luz en lugar de 99% de la rapidez de la luz) su cantidad de movimiento será mucho mayor y seguirá una trayectoria más recta en el campo magnético. Esta rigidez debe compensarse en aceleradores circulares como los ciclotrones o los sincrotrones, donde la cantidad de movimiento dicta el radio de curvatura. En el acelerador lineal que se muestra en la Figura 35.25, el haz de partículas viaja en una trayectoria en línea recta y el cambio en la cantidad de movimiento no produce desviaciones respecto de una trayectoria en línea recta. Las desviaciones ocurren cuando el haz de electrones se dobla en el puerto de salida mediante imanes, como se indica en la Figura 35.26. Sin importar el tipo de acelerador de partículas, los físicos que trabajan con partículas subatómicas todos los días confirman que la definición relativista de la cantidad de movimiento y el límite de rapidez impuesto por la naturaleza son correctos.

En resumen, se ve que, conforme la rapidez de un objeto se aproxima a la rapidez de la luz, su cantidad de movimiento tiende al infinito, lo cual significa que no hay forma de alcanzar la rapidez de la luz. Sin embargo, existe al menos una cosa que alcanza la rapidez de la luz: ¡la luz misma! Pero los fotones de luz no tienen masa y las ecuaciones que se aplican a ellos son diferentes. La luz siempre viaja con la misma rapidez. De modo que, es interesante que una partícula material nunca pueda llevarse a la rapidez de la luz y la luz nunca puede llevarse al reposo.

## 35.8 Masa, energía y $E = mc^2$

**FIGURA 35.27**
Decir que una planta eléctrica suministra 90 millones de megajoules de energía a sus consumidores equivale a decir que suministra 1 gramo de energía a sus consumidores, porque la masa y la energía son equivalentes.

Einstein relacionó no sólo el espacio y el tiempo, sino también la masa y la energía. Un pedazo de materia, incluso en reposo y que no interactúa con nada más, tiene una "energía de ser". A ésta se le llama *energía en reposo*. Einstein concluyó que se necesita energía para hacer masa y que se libera energía si la masa desaparece. La cantidad de energía $E$ se relaciona con la cantidad de masa $m$ por la más célebre ecuación del siglo XX:

$$E = mc^2$$

La $c^2$ es el factor de conversión entre las unidades de energía y las unidades de masa. Debido a la gran magnitud de $c$, a una masa pequeña le corresponde una enorme cantidad de energía.[7]

Recuerda del Capítulo 34 que reducciones diminutas de la masa nuclear tanto en la fisión nuclear como en la fusión nuclear producen una enorme liberación de energía, todo en concordancia con $E = mc^2$. Para el público general, $E = mc^2$ es sinónimo de energía nuclear. Si tuvieras que pesar una planta nuclear completamente abastecida de combustible y luego la pesaras de nuevo una semana después, descubrirías que pesa un poco menos: cerca de 1 gramo menos por cada kilogramo de combustible que experimentó fisión en dicha semana. Parte de la masa del combustible se convirtió en energía. Ahora, es muy interesante que, si pesaras una planta eléctrica de carbón y todo el carbón y el

[7]Cuando $c$ está en metros por segundo y $m$ está en kilogramos, $E$ estará en joules. Si la equivalencia de masa y energía se hubiera entendido hace mucho tiempo, cuando los conceptos de la física comenzaban a formularse, probablemente no habría unidades separadas para la masa y la energía. Más aún, con una redefinición de las unidades de espacio y tiempo, $c$ podría ser igual a 1 y $E = mc^2$ simplemente sería $E = m$.

oxígeno que consume en una semana y luego la pesaras de nuevo con todo el dióxido de carbono y otros productos de combustión que se produjeran durante la semana, también descubrirías que todo ello pesa un poco menos. Una vez más, la masa se convirtió en energía. Cerca de 1 parte en mil millones se habría convertido. Recuerda esto: si ambas plantas producen la misma cantidad de energía, el cambio de masa será el mismo para ambas; no significa ninguna diferencia si la energía se libera por una conversión de masa nuclear o química. La diferencia principal se encuentra en la cantidad de energía liberada en cada reacción individual y la cantidad de masa implicada. La fisión de un solo núcleo de uranio libera 10 millones de veces más energía que la combustión de carbono para producir una sola molécula de dióxido de carbono. Por tanto, unos cuantos camiones llenos de combustible uranio alimentarán una planta de fisión, mientras que una planta de carbón consume muchos trenes de cien vagones cargados de carbón.

Cuando enciendes una cerilla, los átomos de los fósforos de su cabeza se reordenan y se combinan con el oxígeno del aire para formar nuevas moléculas. Las moléculas resultantes tienen masas muy ligeramente menores que las moléculas de los fósforos y el oxígeno por separado. En términos de la masa, el todo es un poco menor que la suma de sus partes, en cantidades que casi no se notan. Para todas las reacciones químicas que ceden energía, existe una correspondiente reducción de masa de alrededor de 1 parte en mil millones.

En cuanto a las reacciones nucleares, una reducción de la masa de 1 parte en mil puede medirse directamente con varios dispositivos. Esta reducción de masa en el Sol por el proceso de fusión termonuclear baña al sistema solar con energía radiante y nutre la vida. La etapa actual de la fusión termonuclear en el Sol ha seguido así durante los últimos 5 mil millones de años, y existe suficiente combustible hidrógeno para que la fusión dure otros 5 mil millones de años. ¡Es bueno tener un Sol del tamaño adecuado!

La ecuación $E = mc^2$ no se limita a reacciones químicas y nucleares. Un cambio en la energía de cualquier objeto en reposo se acompaña de un cambio en su masa. El filamento de una bombilla energizada con electricidad tiene más masa que cuando se apaga. Una taza de té caliente tiene más masa que la misma taza de té cuando está fría. Un reloj al que se le ha dado cuerda tiene más masa que el mismo reloj cuando no tiene cuerda. Pero en estos ejemplos los cambios de masa son increíblemente pequeños, mucho muy pequeños para ser medidos. Incluso los cambios de masa mucho mayores en el cambio radiactivo no se midieron sino hasta después de que Einstein predijera la equivalencia entre la masa y la energía. Sin embargo, ahora es habitual medir las conversiones de masa en energía y de energía en masa.

Considera una moneda con una masa de 1 g. Esperarías que 2 de las mismas monedas tuvieran una masa de 2 g, que 10 monedas tuvieran una masa de 10 g y que 1,000 monedas apiladas en una caja tuvieran una masa de 1 kg. No es así si las monedas se atraen o repelen entre sí. Imagina, por ejemplo, que cada moneda porta una carga eléctrica negativa, de modo que cada moneda repele a las otras monedas. Entonces, para meterlas por la fuerza en la caja se necesita trabajo. Este trabajo se suma a la masa del conjunto. De modo que una caja que contiene 1,000 monedas con carga negativa tiene más de 1 kg de masa. Si, por otra parte, las monedas se atraen entre sí (como los nucleones en el núcleo se atraen mutuamente), se necesita trabajo para separarlas; entonces, una caja con 1,000 monedas tendría una masa menor a 1 kg. De modo que la masa de un objeto no necesariamente es igual a la suma de las masas de sus partes, como se sabe a partir de la medición de las masas de los núcleos. El efecto sería espectacular si pudieras lidiar con partículas cargadas que estuvieran descubiertas. Si en una esfera de 10 cm de diámetro pudieras juntar por la fuerza algunos electrones cuyas masas por separado sumaran 1 g, ¡el conjunto tendría una masa de 40 mil millones kg! En verdad que la equivalencia de masa y energía es significativa.

Antes de que los físicos llegaran a entender que el electrón es una partícula fundamental sin un radio mensurable, algunos especulaban que tenía un tamaño determinado y que su masa era simplemente una medida de cuánto trabajo se necesitaba para comprimir su carga a dicho tamaño.[8]

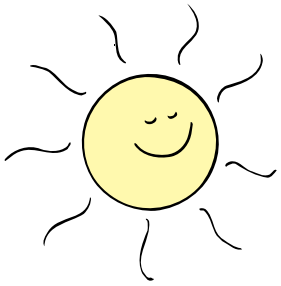


**FIGURA 35.28**
En 1 segundo, 4.5 millones de toneladas de masa se convierten en energía radiante en el Sol. Sin embargo, el Sol es tan masivo, que en 1 millón de años sólo 1 diezmillonésima de la masa del Sol se habrá convertido en energía radiante.

**SCREENCAST:** $E = mc^2$

[8]John Dobson, miembro de la organización de San Francisco Sidewalk Astronomers, especulaba que, así como un reloj se vuelve más masivo cuando se realiza trabajo sobre él al darle cuerda contra la resistencia de su resorte, la masa de todo el Universo no es más que la energía que se destine a darle cuerda contra la gravitación mutua. De acuerdo con este punto de vista, la masa del Universo es equivalente al trabajo realizado para separarlo.

En unidades de medición ordinarias, la rapidez de la luz $c$ es una cantidad grande y su cuadrado es todavía más grande; por tanto, una pequeña cantidad de masa almacena una gran cantidad de energía. La cantidad $c^2$ es un "factor de conversión": convierte la medición de la masa a la medición de energía equivalente. O es la razón entre la energía en reposo y la masa: $E/m = c^2$. Que aparezcan en cualquier forma de esta ecuación no tiene nada que ver con la luz y nada que ver con el movimiento. La magnitud de $c^2$ es 90 mil billones ($9 \times 10^{16}$) J/kg. Un kilogramo de materia tiene una "energía de ser" igual a 90 mil billones de J. Incluso una motita de materia con una masa de sólo 1 mg tiene una energía en reposo de 90 mil millones de J.

$E = mc^2$ indica que la energía y la masa están relacionadas. La masa es energía condensada.

La ecuación $E = mc^2$ es más que una fórmula para convertir masa en otros tipos de energía, o viceversa. Indica más que eso: que la energía y la masa son *la misma cosa*. La masa es energía condensada. Si quieres saber cuánta energía hay en un sistema, mide su masa. Para un objeto en reposo, su energía *es* su masa (llamada su *energía de masa en reposo*), y con movimiento su energía es todavía mayor. La energía, al igual que la masa, muestra inercia. Agita un objeto masivo de ida y vuelta; es la energía en sí la que es difícil agitar.

La primera evidencia de la conversión de energía radiante en masa la proporcionó, en 1932, el físico estadounidense Carl Anderson. Él descubrió el *positrón* por la traza que dejó en una cámara de niebla. El positrón es la *antipartícula* del electrón, igual en masa y espín al electrón pero con carga opuesta. Cuando un fotón de alta frecuencia se acerca a un núcleo atómico, puede crear un electrón y un positrón juntos como un par y, por tanto, crea masa. Las partículas creadas se separan. El positrón no es parte de la materia normal porque vive muy poco tiempo. En cuanto encuentra un electrón, el par se aniquila, lo que envía dos rayos gamma en el proceso. Entonces la masa se convierte de nuevo en energía radiante.[9]

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Se puede ver la ecuación $E = mc^2$ en otra forma y decir que la materia se transforma en energía pura cuando viaja a la rapidez de la luz al cuadrado?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

¡No, no, no! La materia no puede ponerse en movimiento a la rapidez de la luz, mucho menos a la rapidez de la luz al cuadrado (¡que no es una rapidez!). La ecuación $E = mc^2$ simplemente significa que la energía y la masa son "dos lados de la misma moneda".

## 35.9 Principio de correspondencia

SCREENCAST: Principio de correspondencia

El principio de correspondencia se introdujo en el Capítulo 32. Recuerda que indica que cualquier nueva teoría o cualquier nueva descripción de la naturaleza deben concordar con la anterior, donde la anterior dio resultados correctos. Si las ecuaciones de la relatividad especial son válidas, entonces deben corresponder con aquellas de la mecánica clásica cuando se consideran rapideces mucho menores que la rapidez de la luz.

[9]Recuerda que la energía de un fotón es $E = hf$, y que la energía de masa de una partícula es $E = mc^2$. Los fotones de alta frecuencia rutinariamente convierten su energía en masa cuando producen pares de partículas en la naturaleza, y en los aceleradores, donde los procesos pueden observarse. ¿Por qué pares? Sobre todo porque ésta es la única forma en la que no se viola la conservación de carga. De modo que, cuando se crea un electrón, también se crea una antipartícula positrón. Al igualar las dos ecuaciones, $hf = 2mc^2$, donde $m$ es la masa de una partícula (o antipartícula), se observa que la frecuencia mínima de un rayo gamma para la producción de un par de partículas es $f = 2mc^2/h$.

Las ecuaciones de la relatividad para el tiempo, la longitud y la cantidad de movimiento son:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \gamma t_0$$

$$L = L_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = L_0/\gamma$$

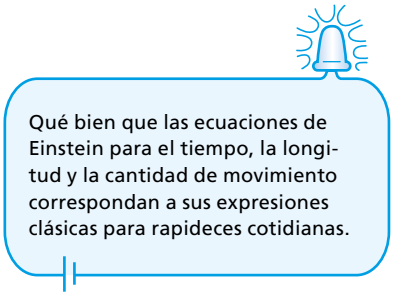
$$p = \frac{mv}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \gamma mv$$

Observa que cada una de estas ecuaciones se reduce a los valores newtonianos para rapideces que son muy pequeñas comparadas con $c$. Entonces la razón $v^2/c^2$ es muy pequeña y, para rapideces cotidianas, pueden considerarse como cero. Las ecuaciones relativistas se convierten en:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-0}} = t_0$$

$$L = L_0\sqrt{1-0} = L_0$$

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1-0}} = mv$$




De modo que, para rapideces cotidianas, la cantidad de movimiento, la longitud y el tiempo de los objetos en movimiento en esencia no cambian. Las ecuaciones de la relatividad especial se sostienen para todas las rapideces, aunque difieren mucho de las ecuaciones clásicas sólo para rapideces cercanas a la rapidez de la luz.

La teoría de la relatividad de Einstein ha planteado muchas preguntas filosóficas. Exactamente, ¿qué es el tiempo? ¿Puede decirse que la forma natural de verlo es que nada ocurre al mismo tiempo? ¿Y por qué el tiempo parece moverse sólo en una dirección? ¿Siempre se ha movido *hacia adelante*? ¿Existen otras partes en el Universo donde el tiempo se mueve *hacia atrás*? ¿Es probable que la percepción tridimensional de un mundo tetradimensional sólo sea un comienzo? ¿Podría haber una quinta dimensión? ¿Una sexta dimensión? ¿Una séptima dimensión? Y si así fuera, ¿cómo sería la naturaleza de estas dimensiones? Tal vez estas preguntas sin respuesta puedan responderlas los físicos del mañana. ¡Qué emocionante!

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Marco de referencia.** Lugar (por lo general un conjunto de ejes coordenados) con respecto al cual pueden describirse la posición y el movimiento.

**Postulados de la teoría de la relatividad especial.** (1) Todas las leyes de la naturaleza son las mismas en todos los marcos de referencia que se mueven de manera uniforme. (2) La rapidez de la luz en el espacio libre tiene el mismo valor medido sin importar el movimiento de la fuente o el movimiento del observador; esto es: la rapidez de la luz es constante.

**Simultaneidad.** Ocurrencia al mismo tiempo. Dos eventos que son simultáneos en un marco de referencia no necesariamente son simultáneos en un marco que se mueve con respecto al primer marco.

**Espacio-tiempo.** El continuo tetradimensional en el cual tienen lugar todos los eventos y existen todas las cosas. Tres dimensiones son las coordenadas del espacio, y la cuarta es el tiempo.

**Dilatación del tiempo.** La lentificación del tiempo para un objeto en movimiento, medido por quienes ven su movimiento.

**Contracción de la longitud.** La contracción del espacio en la dirección de movimiento de un observador como resultado de la rapidez.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 35.1 El movimiento es relativo

1. Si caminas a 1 km/h por el pasillo hacia el frente de un tren que se mueve a 60 km/h, ¿cuál es tu rapidez en relación al suelo?
2. En la pregunta anterior, ¿tu rapidez aproximada en relación al Sol mientras caminas por el pasillo del tren cambió un poco o mucho?
3. ¿Qué hipótesis planteó G. F. FitzGerald para explicar los hallazgos de Michelson y Morley?
4. ¿Qué idea clásica acerca del espacio y del tiempo rechazó Einstein?

### 35.2 Postulados de la teoría de la relatividad especial

5. ¿Qué es lo que se mantiene igual en el primer postulado de Einstein?
6. ¿Qué es constante en el segundo postulado de Einstein?

### 35.3 Simultaneidad

7. En el interior del compartimiento en movimiento de la Figura 35.4, la luz recorre cierta distancia hacia el extremo frontal y cierta distancia hacia el extremo posterior del compartimiento. ¿Cómo se comparan estas distancias vistas en el marco de referencia de la nave en movimiento?
8. ¿Cómo se comparan las distancias de la pregunta 7 vistas en el marco de referencia de un observador en un planeta estacionario?

### 35.4 El espacio-tiempo y la dilatación del tiempo

9. ¿Cuántos ejes coordenados se utilizan generalmente para describir el espacio tridimensional? ¿Qué es lo que mide la cuarta dimensión?
10. ¿Bajo qué condiciones tú y un amigo compartirán el mismo reino de espacio-tiempo? ¿Cuándo no compartirán el mismo reino?
11. ¿Qué hay de especial acerca de la razón entre la distancia recorrida por un destello de luz y el tiempo que la luz tarda en recorrer esta distancia?
12. Se necesita tiempo para que la luz viaje por una trayectoria de un punto a otro. Si esta trayectoria se ve más larga debido al movimiento, ¿qué ocurre con el tiempo que tarda la luz en recorrer esta trayectoria más larga?
13. ¿Cómo se le llama al "estiramiento" del tiempo?
14. ¿Cuál es una expresión algebraica para el factor de Lorentz $\gamma$ (gamma)? ¿Por qué $\gamma$ nunca es menor que 1?
15. ¿Cómo difieren las mediciones de tiempo para eventos en un marco de referencia que se mueve a 50% de la rapidez de la luz con respecto a ti? ¿A 99.5% de la rapidez de la luz con respecto a ti?
16. ¿Cuál es la evidencia de la dilatación del tiempo?
17. Cuando una luz que destella se aproxima hacia ti, cada destello que llega a ti tiene una distancia más corta que recorrer. ¿Qué efecto tiene esto sobre la frecuencia con la que recibes los destellos?
18. Cuando una fuente de luz que destella se aproxima a ti, ¿aumenta la rapidez de la luz o la frecuencia de la luz, o ambas?
19. Si una fuente de luz que destella se mueve hacia ti suficientemente rápido como para que el intervalo de tiempo entre destellos se reduzca a la mitad, ¿cuán largo será el intervalo de tiempo entre destellos si la fuente se aleja de ti con la misma rapidez?
20. ¿Cuántos marcos de referencia experimenta el gemelo que queda en casa en el viaje del gemelo? ¿Cuántos marcos de referencia experimenta el gemelo viajero?

### 35.5 Suma de velocidades

21. ¿Cuál es el valor máximo de $v_1 v_2/c^2$ en una situación extrema? ¿Cuál es el valor más pequeño?
22. ¿La regla relativista

$$V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \dfrac{v_1 v_2}{c^2}}$$

es consistente con el hecho de que la luz puede tener sólo una rapidez en todos los marcos de referencia que se mueven de manera uniforme?

23. ¿Cuáles dos principales obstáculos impiden viajar hoy a través de la galaxia con rapideces relativistas?
24. ¿Cuál es el estándar universal del tiempo?

### 35.6 Contracción de la longitud

25. ¿Qué longitud aparentaría tener un metro si viajara como una lanza arrojada adecuadamente a 99.5% de la rapidez de la luz?
26. ¿Qué longitud aparentaría tener el metro de la pregunta anterior si viajara con su longitud perpendicular a su dirección de movimiento? (¿Por qué tu respuesta es diferente de tu respuesta a la pregunta anterior?)
27. Si viajaras en una nave con gran rapidez, ¿los metros a bordo te parecerían contraídos? Defiende tu respuesta.

### 35.7 Cantidad de movimiento relativista

28. ¿Cuál sería la cantidad de movimiento de un objeto si se moviera con la rapidez de la luz?
29. Cuando un haz de partículas cargadas atraviesa un campo magnético, ¿cuál es la evidencia de que las partículas del haz tienen cantidades de movimiento mayores que el valor $mv$?

### 35.8 Masa, energía y $E = mc^2$

30. Compara las cantidades de masa convertida en energía en las reacciones nucleares y en las reacciones químicas.
31. ¿Cómo se compara la energía de la fisión de un solo núcleo de uranio, con la energía de la combustión de un solo átomo de carbono?
32. ¿La ecuación $E = mc^2$ se aplica a las reacciones químicas?
33. ¿Cómo es que $E = mc^2$ describe las identidades de la energía y la masa?

### 35.9 Principio de correspondencia

34. ¿De qué manera el principio de correspondencia se relaciona con la relatividad especial?
35. ¿Las ecuaciones de la relatividad para el tiempo, la longitud y la cantidad de movimiento siguen siendo verdaderas para rapideces cotidianas? Explica.

## PIENSA Y REALIZA (APLICACIÓN MANUAL)

36. Llama a la abuela y explícale cómo las teorías de relatividad de Einstein tienen que ver con lo rápido y lo grande: que la relatividad no es sólo "allá afuera", sino también afecta este mundo. Cuéntale cómo estas ideas te motivan a conocer más del Universo. Impresiona a la abuela usando adecuadamente las palabras *ahí*, *existen* y *sus* en tu explicación.

## PIENSA Y RESUELVE (APLICACIÓN MATEMÁTICA)

*Recuerda de este capítulo que el factor gamma ($\gamma$) rige tanto la dilatación del tiempo como la contracción de la longitud, donde*

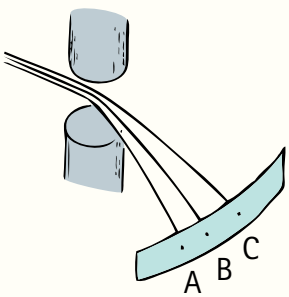
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

*Cuando multiplicas el tiempo en un marco en movimiento por $\gamma$, obtienes el tiempo más largo (dilatado) en tu marco fijo. Cuando divides entre $\gamma$ la longitud en un marco en movimiento, obtienes la longitud más corta (contraída) en tu marco fijo.*

37. Imagina una nave espacial con gran rapidez equipada con una fuente de luz que destella. Si la frecuencia de los destellos vistos en una nave que se aproxima es del doble de lo que era cuando la nave estaba a una distancia fija, ¿en cuánto cambió el periodo (intervalo de tiempo entre destellos)? ¿Este periodo es constante para una rapidez relativa constante? ¿Para un movimiento acelerado? Defiende tu respuesta.
38. Una nave estelar pasa la Tierra a 80% de la rapidez de la luz y envía un dron hacia adelante a la mitad de la rapidez de la luz con respecto a sí misma. Demuestra que el dron viaja a 93% de la rapidez de la luz con respecto a la Tierra.
39. Imagina que la nave del problema anterior de algún modo viaja a $c$ con respecto a la Tierra y dispara un dron hacia adelante con una rapidez $c$ con respecto a ella misma. Usa la ecuación de la suma relativista de velocidades para demostrar que la rapidez del dron con respecto a la Tierra sigue siendo $c$.
40. Un pasajero en un autobús interplanetario expreso que viaja a $v = 0.99c$ duerme una siesta de 5 minutos, de acuerdo con su reloj. Demuestra que su siesta, desde un lugar en un planeta fijo, dura 35 minutos.
41. De acuerdo con la mecánica newtoniana, la cantidad de movimiento del autobús del problema anterior es $p = mv$. De acuerdo con la relatividad, es $p = \gamma$. ¿Cómo se compara la cantidad de movimiento real del autobús que se mueve a $0.99c$, con la cantidad de movimiento que tendría si fuera válida la mecánica clásica? ¿Cómo se compara la cantidad de movimiento de un electrón que viaja a $0.99c$ con su cantidad de movimiento clásica?
42. El autobús del problema anterior mide 70 pies de largo, de acuerdo con sus pasajeros y su conductor. Demuestra que su longitud, vista desde un punto en un planeta fijo, es un poco menor que 10 pies.
43. Si el autobús del problema 40 disminuyera su rapidez hasta un "mero" 10% de la rapidez de la luz, demuestra que la siesta del pasajero tendría una duración un poco mayor a 5 minutos.
44. Si el conductor del autobús del problema 40 decide conducir a 99.99% de la rapidez de la luz para ganar algo de tiempo, demuestra que tú medirías la longitud del autobús en poco menos que 1 pie.
45. Supón que los taxis cohete del futuro se mueven alrededor del sistema solar a la mitad de la rapidez de la luz. Por un viaje de 1 hora, medido por un reloj en el taxi, a un conductor se le pagan 10 estelares. El sindicato de conductores de taxi exige que el pago se base en el tiempo de la Tierra y no en el tiempo del taxi. Si esta demanda se satisface, demuestra que el nuevo pago por el mismo viaje sería de 11.5 estelares.
46. El cambio fraccional de reaccionar masa a energía en un reactor de fisión es de alrededor de 0.1%, o 1 parte en mil. Por cada kilogramo de uranio que se fisiona en su totalidad, ¿cuánta energía se libera? Si la energía cuesta 3 centavos de dólar por megajoule, ¿cuánto vale esta energía en dólares?

## PIENSA Y CLASIFICA (ANÁLISIS)

47. Unos electrones se disparan con diferentes rapideces, atraviesen un campo magnético y se doblan de sus trayectorias en línea recta para golpear el detector en los puntos mostrados. Clasifica las rapideces de los electrones, de la más alta a la más baja.




48. Para un observador en la Tierra, los metros en tres naves espaciales tienen las siguientes longitudes. Clasifica las rapideces de las naves espaciales con respecto a la Tierra, de la más alta a la más baja.

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

49. Si estuvieras en un tren que viaja con suavidad, sin ventanas, ¿podrías percibir la diferencia entre un movimiento uniforme y el reposo? ¿Entre un movimiento acelerado y el reposo? Explica cómo podrías hacer tal distinción con un tazón lleno de agua.
50. Una persona que viaja en el techo de un vagón lanza una bola hacia adelante. (a) Si ignoras el arrastre aerodinámico y con relación al suelo, ¿la bola se mueve más rápido o más lento cuando el tren se mueve que cuando está quieto? (b) Con respecto al vagón, ¿la bola se mueve más rápido o más lento cuando el tren se mueve que cuando el tren está quieto?
51. Ahora imagina que la persona que está encima del vagón envía el haz de luz de un reflector en la dirección en que viaja el tren. Compara la rapidez del haz de luz con respecto al suelo cuando el tren está en reposo y cuando está en movimiento. ¿Cómo difiere el comportamiento del haz de luz del comportamiento de la bola del problema 50?
52. Cuando conduces por la autopista, te mueves a través del espacio. ¿A través de qué más te estás moviendo?
53. En el Capítulo 26 aprendiste que la luz viaja más lento en el vidrio que en el aire. ¿Esto contradice el segundo postulado de Einstein?
54. Los astrónomos ven la luz proveniente de galaxias distantes que se alejan de la Tierra con rapideces mayores que 10% de la rapidez de la luz. ¿Qué tan rápido llega esta luz a los telescopios de los astrónomos?
55. El haz de luz proveniente de un láser en una tornamesa giratoria se proyecta en el espacio. A cierta distancia, el haz se mueve a través del espacio más rápido que $c$. ¿Por qué esto no contradice la relatividad?
56. ¿Un haz de electrones puede barrer a través de la cara de un tubo de rayos catódicos con una rapidez mayor que la rapidez de la luz? Explica.
57. El evento A ocurre antes que el evento B en cierto marco de referencia. ¿De qué manera el evento B podría ocurrir antes que el evento A en algún otro marco de referencia?
58. Si dos relámpagos golpean exactamente el mismo lugar exactamente al mismo tiempo en un marco de referencia, ¿es posible que observadores en otros marcos vean los relámpagos golpear en diferentes momentos o en diferentes lugares?
59. Supón que la bombilla de la nave de las Figuras 35.4 y 35.5 está más cerca del frente que de la parte posterior del compartimiento, de modo que el observador en la nave ve la luz que llega al extremo frontal antes de llegar al extremo posterior. ¿Todavía es posible que el observador exterior vea que la luz llegue primero al extremo posterior?
60. Dado que existe un límite superior para la rapidez de una partícula, ¿se deduce que también existe un límite superior para su cantidad de movimiento y, en consecuencia, para su energía cinética? Explica.
61. La luz recorre cierta distancia en, por decir, 20,000 años. ¿Cómo es posible que un astronauta, que viaja más lento que la luz, pueda llegar tan lejos en 20 años de su vida, si la luz la recorre en 20,000 años?
62. ¿Es posible, en principio, que un ser humano, quien tiene una esperanza de vida de 70 años, pueda hacer un viaje redondo a una parte del Universo a miles de años-luz de distancia? Explica.
63. Una gemela, quien realiza un largo viaje con rapideces relativistas, regresa más joven que su hermana quien permaneció en casa. ¿Podría ella regresar antes de que haya nacido su hermana gemela? Defiende tu respuesta.
64. ¿Es posible que un hijo sea biológicamente más viejo que sus padres? Explica.
65. Si estuvieras en una nave espacial que se aleja de la Tierra con una rapidez cercana a la rapidez de la luz, ¿qué cambios observarías en tu pulso? ¿En tu volumen? Explica.
66. Si estuvieras en la Tierra monitorizando a una persona en una nave espacial que se aleja de la Tierra con una rapidez cercana a la rapidez de la luz, ¿qué cambios observarías en su pulso? ¿En su volumen? Explica.
67. Debido a la contracción de la longitud, ves a las personas en una nave espacial que pasa junto a ti un poco más pequeñas de lo que normalmente se ven. ¿Cómo te ven estas personas?
68. Debido a la dilatación del tiempo, observas que las manecillas del reloj de tu amigo se mueven con lentitud. ¿Cómo ve tu amigo tu reloj: que avanza con lentitud, con rapidez o ninguno de los anteriores?
69. ¿La ecuación de la dilatación del tiempo muestra que la dilatación ocurre con todas las rapideces, ya sean lentas o rápidas? Explica.
70. Si vivieras en un mundo donde las personas acostumbraran viajar con rapideces cercanas a la rapidez de la luz, ¿por qué sería arriesgado hacer una cita con el dentista a las 10 de la mañana del próximo jueves?
71. ¿Cómo se comparan las densidades medidas de un cuerpo en reposo y en movimiento?
72. Si observadores estacionarios miden la forma de un objeto en movimiento que pasa y señalan que es exactamente circular, ¿cuál es la forma del objeto cuando lo ven de frente observadores a bordo del objeto, viajando con él?
73. La fórmula que relaciona la rapidez, la frecuencia y la longitud de onda de las ondas electromagnéticas, $v = f\lambda$, se conocía antes de desarrollarse la relatividad. La relatividad no ha cambiado esta ecuación, pero le agregó una nueva característica. ¿Cuál es esta característica?
74. La luz se refleja en un espejo en movimiento. ¿Cómo difiere la luz reflejada de la luz incidente, y en qué es igual?
75. Conforme un metro pasa junto a ti, tus mediciones muestran que su cantidad de movimiento es el doble que su cantidad de movimiento clásica y su longitud es de 1 m. ¿En qué dirección apunta el metro?
76. En el ejercicio anterior, si el metro se mueve en una dirección a lo largo de su longitud (como una lanza arrojada de manera adecuada), ¿qué tan larga medirías su longitud?
77. Si una nave espacial a gran rapidez parece encogerse a la mitad de su longitud normal, ¿cómo se compara su cantidad de movimiento con la fórmula clásica $p = mv$?

78. ¿Cómo es que la cantidad de movimiento de una partícula puede aumentar 5% con sólo un aumento de 1% en su rapidez?
79. El acelerador lineal de 2 millas de la Universidad de Stanford, en California, "parece" ser de menos de un metro de largo para los electrones que viajan en él. Explica.
80. En el acelerador de Stanford, los electrones terminan su viaje con una energía miles de veces mayor que su energía en reposo inicial. En teoría, si pudieras viajar con ellos, ¿observarías un aumento en su energía? ¿En su cantidad de movimiento? En tu marco de referencia en movimiento, ¿cuál sería la rapidez aproximada del blanco al que se dirigen?
81. Los electrones que iluminan la pantalla en el cinescopio de los televisores antiguos viajaban casi a un cuarto de la rapidez de la luz y tenían casi 3% más energía que los hipotéticos electrones no relativistas que viajan con la misma rapidez. ¿Este efecto relativista tiende a aumentar o disminuir la cuenta de luz?
82. ¿Cómo puede aplicarse la idea del principio de correspondencia fuera del campo de la física?
83. ¿Qué significa la ecuación $E = mc^2$?
84. De acuerdo con $E = mc^2$, ¿cómo se compara la cantidad de energía en un kilogramo de plumas, con la cantidad de energía en un kilogramo de hierro?
85. ¿Una batería de linterna completamente cargada pesa más que la misma batería cuando se agota? Defiende tu respuesta.
86. Cuando miras el Universo, ves hacia el pasado. John Dobson, fundador del San Francisco Sidewalk Astronomers, afirma que uno ni siquiera puede ver *ahora* el dorso de sus manos; de hecho, no puede ver nada *ahora*. ¿Estás de acuerdo? Explica.
87. Elabora cuatro preguntas de opción múltiple, cada una que compruebe que un compañero de clase comprende (a) la dilatación del tiempo, (b) la contracción de la longitud, (c) la cantidad de movimiento relativista y (d) $E = mc^2$.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

88. La idea de que la fuerza causa aceleración no parece extraña. Ésta y otras ideas de la mecánica newtoniana son consistentes con la experiencia cotidiana. Pero las ideas de la relatividad sí parecen extrañas y más difíciles de comprender. Discute.
89. ¿Por qué Michelson y Morley al principio consideraron su experimento como un fracaso? (Discute ejemplos que puedas haber encontrado donde el fracaso tenga que ver, no con la falta de habilidad, sino con la imposibilidad de la tarea.)
90. ¿La relatividad especial permite que *algo* viaje más rápido que la luz? Discute.
91. Cuando un haz de luz se aproxima a ti, su frecuencia es más alta y su longitud de onda es más corta. ¿Esto contradice el postulado de que la rapidez de la luz no puede cambiar? Discute.
92. Considera la rapidez del punto donde se unen las cuchillas de una tijera cuando está cerrada. Mientras más cerca se cierren las cuchillas, más rápido se mueve el punto. En principio, el punto podría moverse más rápido que la luz. Lo mismo sucede con la rapidez del punto donde un hacha encuentra la madera cuando la hoja del hacha encuentra la madera no muy horizontalmente; el punto de contacto viaja más rápido que el hacha. De igual manera, un par de haces láser que se cruzan y se mueven hasta estar paralelos produce un punto de intersección que puede moverse más rápido que la luz. Discute por qué estos ejemplos no contradicen la relatividad especial.
93. La rapidez de la luz es un límite de rapidez en el Universo, al menos para el Universo tetradimensional que se entiende. Ninguna partícula material puede alcanzar o sobrepasar este límite aun cuando sobre él se ejerza una fuerza continua incesante. Analiza evidencia que respalde esto.
94. Dos alfileres de seguridad, idénticos excepto que uno está cerrado y el otro no, se colocan en baños ácidos idénticos. Después de que los alfileres se disuelven, ¿qué es diferente acerca de los dos baños ácidos?
95. Un trozo de material radiactivo encerrado en un grueso contenedor de plomo se pone más caliente conforme sus núcleos decaen y liberan energía. ¿La masa del sistema trozo-contenedor cambia? Si es así, ¿aumenta o disminuye?
96. Los muones son partículas elementales que se forman en lo alto de la atmósfera por las interacciones de los rayos cósmicos con los núcleos atómicos que ahí se encuentran. Los muones son radiactivos y tienen vidas promedio de alrededor de dos millonésimas de segundo. Aun cuando viajan casi a la rapidez de la luz, muy pocos deberían ser detectados a nivel del mar después de viajar a través de la atmósfera... al menos de acuerdo con la física clásica. Sin embargo, mediciones de laboratorio demuestran que los muones llegan en grandes cantidades a la superficie de la Tierra. Discute y explica.
97. Una de las novedades del futuro puede ser el "salto centenario", donde los ocupantes de naves espaciales de gran rapidez partirían de la Tierra durante varios años y regresarían siglos después. Discute los obstáculos actuales para tal práctica.
98. El enunciado del filósofo Soren Kierkegaard, de que "la vida sólo puede ser comprendida hacia atrás; pero debe vivirse hacia adelante", ¿es consistente con la teoría de la relatividad especial?
99. Tu compañero de estudio dice que la materia no puede crearse ni destruirse. ¿Qué le dirías para corregir esta afirmación?
100. Discute con tus amigos cómo ocurre la contracción de la longitud de un auto de carreras que viaja a 200 millas por hora, pero por qué puede ignorarse la reducción.

36

CAPÍTULO 36

# Teoría de la relatividad general


36.1 Principio de equivalencia

36.2 Doblamiento de la luz por la gravedad

36.3 Gravedad y tiempo: corrimiento gravitacional al rojo

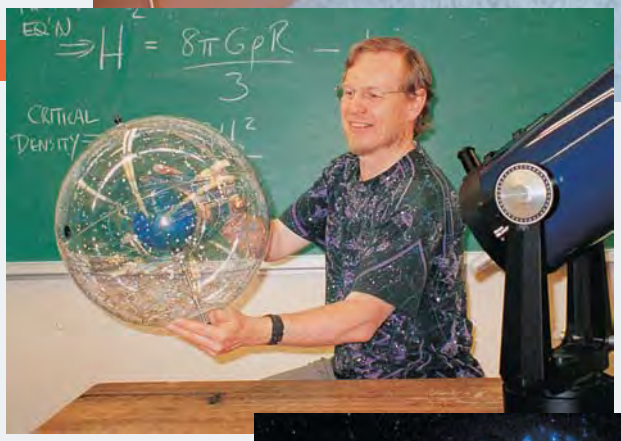
36.4 Gravedad y espacio: el movimiento de Mercurio

36.5 Gravedad, espacio y una nueva geometría

36.6 Ondas gravitacionales

36.7 Gravitación newtoniana y einsteiniana

1



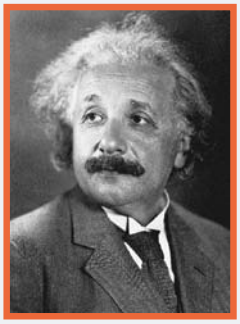

2

3

4

1 Cuando tu unidad GPS (Sistema de Posicionamiento Global) te indica dónde estás, agradéceselo a Einstein. 2 Richard Crowe inicia su conferencia sobre la relatividad general con una esfera celeste. 3 Cuando los astrofísicos hacen mediciones de eventos galácticos lejanos, se lo agradecen a Einstein. 4 Stephanie Hewitt ilustra una predicción de la relatividad general de Einstein: la desviación de la luz estelar por parte del Sol.

Cuando Einstein era un joven estudiante faltó a muchas clases, prefería estudiar por su cuenta, y en 1900, para aprobar sus exámenes, se quemó las pestañas con la ayuda de los meticulosos apuntes de un amigo. Tiempo después hizo este comentario: "… después de aprobar el examen final, durante todo un año me rehusé a pensar en ningún problema científico". Durante este año se convirtió en ciudadano de Suiza, aceptó un puesto temporal como profesor de verano y ofreció asesorías a dos estudiantes de bachillerato. Aconsejaba a los padres, siendo él mismo profesor de bachillerato, que sacaran a los muchachos de la escuela, donde, afirmó, su curiosidad natural se iba extinguiendo. El trabajo de Einstein como tutor duró poco tiempo.



No fue sino hasta dos años después de su graduación que Einstein consiguió un empleo estable, como analista de patentes en la Oficina Suiza de Patentes, en Berna. Einstein conservó este empleo durante más de siete años. Encontró el trabajo bastante interesante, y en ocasiones estimulaba su imaginación científica, pero principalmente lo liberaba de preocupaciones financieras y le daba tiempo de reflexionar sobre los problemas de la física que lo intrigaban.

Sin conexiones académicas de ningún tipo y, en esencia, sin ningún contacto con otros físicos, trazó los ejes principales a lo largo de los cuales se desarrollaría la física teórica del siglo XX. En 1905, a la edad de 26 años, obtuvo su doctorado en física y publicó cuatro artículos fundamentales. El primero fue acerca de la teoría cuántica de la luz e incluía una explicación del efecto fotoeléctrico, por el cual ganó el Premio Nobel de Física en 1921. El segundo artículo abordaba los aspectos estadísticos de la teoría molecular y el movimiento browniano, una prueba de la existencia de los átomos. Su tercer y más famoso artículo fue acerca de la relatividad especial. En un cuarto artículo presentó la famosa $E = mc^2$.

Luego vinieron diez años de intenso trabajo, que condujeron en 1915 a la **teoría de la relatividad general**, con la cual Einstein presentaba una nueva teoría de la gravitación que incluía la teoría de Newton como un caso especial. Estos artículos vanguardistas tuvieron una enorme influencia en el curso de la física moderna.

Las preocupaciones de Einstein no se limitaban a la física. Vivió en Berlín durante la Primera Guerra Mundial y denunció el militarismo alemán de su época. Expresó públicamente su profunda convicción de que la guerra debía abolirse y que debía fundarse una organización internacional que controlara las disputas entre las naciones. En 1933, mientras Einstein visitaba Estados Unidos, Hitler asumió el poder. Einstein se pronunció en contra de las políticas raciales de Hitler y renunció a su puesto en la Universidad de Berlín. Al no estar seguro ahora en Alemania, Einstein se trasladó a Estados Unidos y aceptó un puesto de investigación en el Instituto para Estudios Avanzados en Princeton, Nueva Jersey.

En 1939, un año antes de que Einstein se convirtiera en ciudadano estadounidense, y después de que los científicos alemanes consiguieron fisionar un átomo de uranio, varios prominentes científicos húngaro-estadounidenses lo exhortaron a escribir la famosa carta al presidente Roosevelt donde señalaba las posibilidades científicas de una bomba nuclear. Einstein era pacifista, pero la idea de que Hitler desarrollara tal bomba lo impulsó a actuar. El resultado fue la construcción de la primera bomba nuclear, la cual, irónicamente, se detonó en Japón después de la caída de Alemania.

Einstein creía que el Universo era indiferente a la condición humana y afirmó que, para que la humanidad pudiera continuar, debía crearse un orden moral. Abogó intensamente por la paz mundial a través del desarme nuclear. Las bombas nucleares, remarcó Einstein, cambiaron todo menos la forma de pensar.

El filósofo de la ciencia, C. P. Snow, quien conoció a Einstein, dijo de él, en una reseña de *The Born–Einstein Letters, 1916-1955* (Epistolario Born-Einstein, 1916-1955): "Einstein fue la mente más poderosa del siglo XX y una de las más poderosas que ha existido jamás. Él era más que eso. Era un hombre con una gran personalidad, y quizá sobre todo, de estatura normal. […] He conocido a muchas personas a quienes el mundo llama grandes; de ellas, él fue por mucho, por un orden de magnitud, el más impresionante. Él fue —a pesar de la calidez, la humanidad, el toque de humor— el hombre más diferente de todos".

Einstein fue más que un gran científico; fue un hombre con disposición y sin pretensiones, con una profunda preocupación por el bienestar del prójimo. La elección de Einstein como persona del siglo por la revista *Time* al final del siglo XX fue la más acertada, e incontrovertible.

## 36.1 Principio de equivalencia

En 1905 Einstein postuló que ninguna observación realizada dentro de una cámara cerrada podría determinar si la cámara está en reposo o en movimiento con velocidad constante; esto es: ninguna medición mecánica, eléctrica, óptica o de cualquier otra índole física que uno pudiera realizar dentro de un compartimiento cerrado en un tren

**SCREENCAST: Principio de equivalencia**

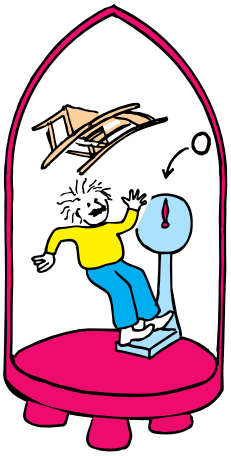


**FIGURA 36.1**
Todo carece de peso en el interior de una nave espacial no acelerada lejos de influencias gravitacionales.

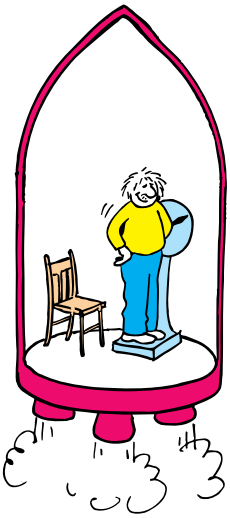


**FIGURA 36.2**
Cuando la nave espacial acelera, un ocupante en su interior siente "gravedad."

que viaje de manera uniforme por una vía recta (o en un avión que vuele a través de aire en calma con la cortina de la ventana corrida) podría dar ninguna información que indicara si el tren se movía o estaba en reposo (o si el avión estaba en el aire o en reposo sobre la pista). Pero si la vía no fuera lisa y recta (o si el aire fuese turbulento), la situación sería muy diferente: el movimiento uniforme cedería su lugar a un movimiento acelerado, que se apreciaría con facilidad. La convicción de Einstein de que las leyes de la naturaleza deben expresarse en la misma forma en todo marco de referencia, acelerado o no acelerado, fue la principal motivación que lo condujo a la teoría de la relatividad general.

Mucho antes de que hubiera naves espaciales reales, Einstein pudo imaginarse en un vehículo alejado de influencias gravitacionales. En dicha nave espacial en reposo o en movimiento uniforme en relación con las estrellas distantes, él y todo lo que estuviera en el interior de la nave flotaría libremente; no habría "arriba" ni "abajo". Pero, cuando los motores de la nave se encendieran y la nave acelerara, las cosas serían diferentes: se observarían fenómenos como los causados por la gravedad. La pared adyacente a los motores de la nave empujaría contra todos los ocupantes y se convertiría en el piso, mientras que la pared opuesta se convertiría en el techo. Los ocupantes de la nave podrían ponerse de pie sobre el piso e incluso saltar. Si la aceleración de la nave fuera igual a $g$, los ocupantes bien podrían convencerse de que la nave no acelera, sino que está en reposo sobre la superficie de la Tierra.

Para examinar esta nueva "gravedad" en una nave espacial que acelera, considera los resultados de soltar dos bolas dentro de la nave espacial, una hecha de madera y la otra de plomo. Cuando las bolas se sueltan, siguen moviéndose hacia arriba una al lado de la otra con la misma velocidad que la nave tenía al momento en que se soltaron. Si la nave se moviera con una *velocidad constante* (aceleración cero), las bolas permanecerían suspendidas en el mismo lugar porque ellas y la nave recorren la misma distancia en cualquier intervalo de tiempo determinado. Pero, debido a que la nave acelera, el piso se mueve hacia arriba más rápido que las bolas, con el resultado de que el piso pronto se topa con las bolas (Figura 36.3). Ambas bolas, sin importar su masa, encuentran el piso al mismo tiempo. Al recordar la demostración de Galileo en la torre inclinada de Pisa, los ocupantes de la nave probablemente atribuirían sus observaciones a la fuerza de gravedad.

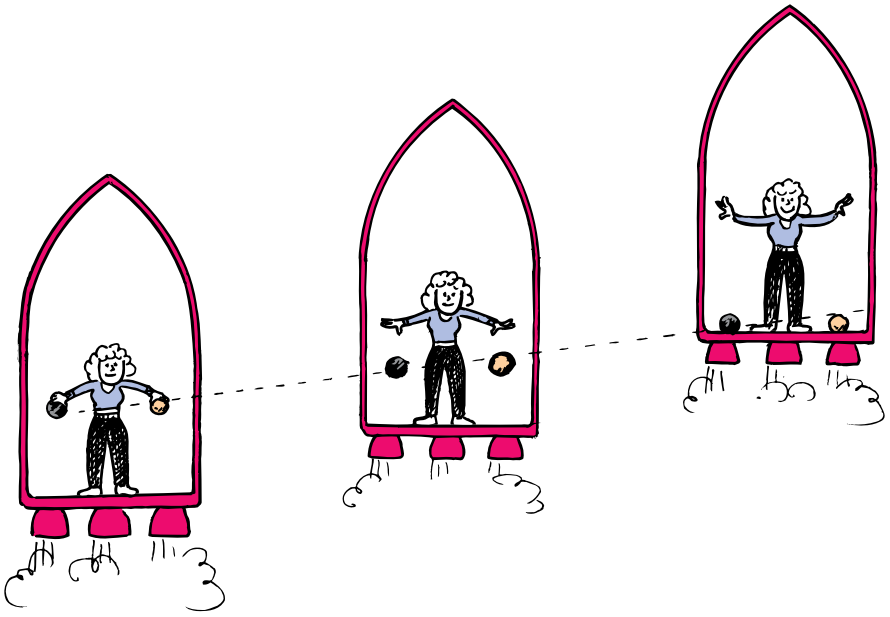


**FIGURA 36.3**
Para un observador dentro de la nave que acelera, una bola de plomo y una bola de madera parecen caer juntas cuando se les suelta.

**pti**

- La relatividad especial es "especial" en el sentido de que aborda los marcos de referencia con un movimiento uniforme: los que no están acelerados. La relatividad general es "general" y aborda también los marcos de referencia acelerados. La teoría de la relatividad general presenta una nueva teoría de la gravedad.

Las dos interpretaciones de las bolas que caen son igualmente válidas, y Einstein incorporó esta equivalencia, o imposibilidad de distinguir entre gravitación y aceleración, en el fundamento de su teoría de la relatividad general. El **principio de equivalencia** afirma que las observaciones hechas en un marco de referencia acelerado son indistinguibles de las observaciones hechas en un campo gravitacional newtoniano. Esta equivalencia sería interesante mas no revolucionaria si pudiera aplicarse sólo a fenómenos mecánicos, pero Einstein fue más allá y afirmó que el principio se sostiene para todos los fenómenos naturales; también se sostiene para los fenómenos ópticos y para todos los electromagnéticos.

**SCREENCAST: Relatividad general**

**PUNTO DE CONTROL**

**Si sueltas una bola dentro de una nave espacial en reposo sobre una plataforma de lanzamiento, verás que acelera hacia el piso. Lejos de la Tierra, ¿de qué otro modo podrías ver que la bola hace lo mismo?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

También podrías ver que la bola acelera hacia el piso si tu nave espacial acelera a $g$.

## 36.2 Doblamiento de la luz por la gravedad

Una bola lanzada lateralmente en una nave espacial estacionaria en una región sin gravedad seguirá una trayectoria en línea recta con respecto tanto a un observador dentro de la nave como a un observador estacionario fuera de la nave. Pero si la nave acelera, el piso se adelanta a la bola como en el ejemplo anterior. Un observador fuera de la nave todavía ve una trayectoria en línea recta, pero para un observador dentro de la nave que acelera, la trayectoria es curva; es una parábola (Figura 36.4b). Lo mismo sucede con un haz de luz.

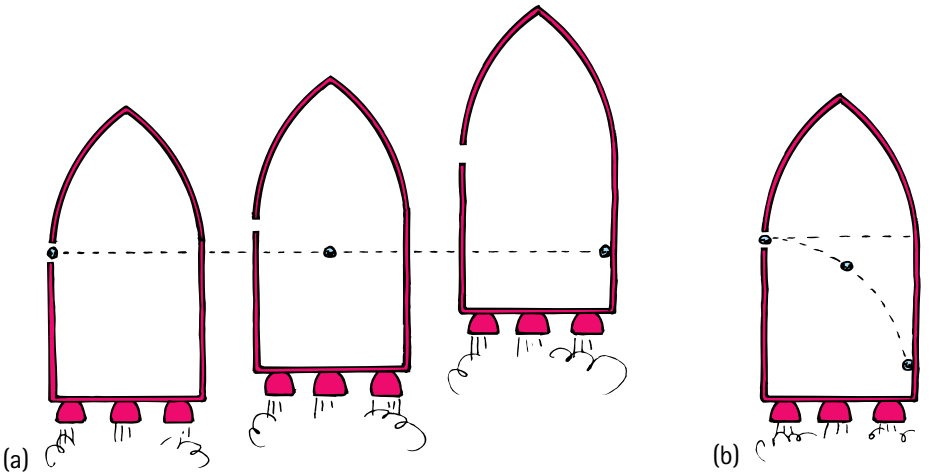



**FIGURA 36.4**
(a) Un observador externo ve que una bola lanzada horizontalmente viaja en línea recta. Puesto que la nave se mueve hacia arriba mientras la bola viaja horizontalmente, la bola golpea la pared que está enfrente de la ventana por debajo de un punto. (b) Para un observador en el interior, la bola se dobla como si estuviera en un campo gravitacional.

Imagina que un rayo de luz entra en la nave espacial horizontalmente por una ventana lateral, atraviesa una hoja de vidrio en medio de la cabina, deja un rastro visible y luego llega a la pared de enfrente, todo en un tiempo muy corto. El observador externo ve que el rayo de luz entra por la ventana y se mueve horizontalmente a lo largo de una línea recta con una velocidad constante hacia la pared de enfrente. Pero la nave espacial acelera hacia arriba. Durante el tiempo que la luz tarda en llegar a la hoja de vidrio, la nave espacial se mueve hacia arriba determinada distancia, y, durante el tiempo en que la luz continúa hacia la pared de enfrente, la nave espacial se mueve hacia arriba una distancia mayor. De este modo, para los observadores en la nave espacial la luz siguió una trayectoria que se curva hacia abajo (Figura 36.5b). En este marco de referencia

En realidad Einstein se imaginó que estaba en elevadores, ¡sin duda más comunes en la época que las naves espaciales!

acelerado, el rayo de luz se desvía hacia abajo, hacia el piso, como se desvía la bola lanzada en la Figura 36.4b. La curvatura de la bola de movimiento lento es muy pronunciada, pero si la bola de algún modo se lanzara horizontalmente por la cabina de la nave espacial con una velocidad igual a la de la luz, su curvatura coincidiría con la curvatura del rayo de luz.

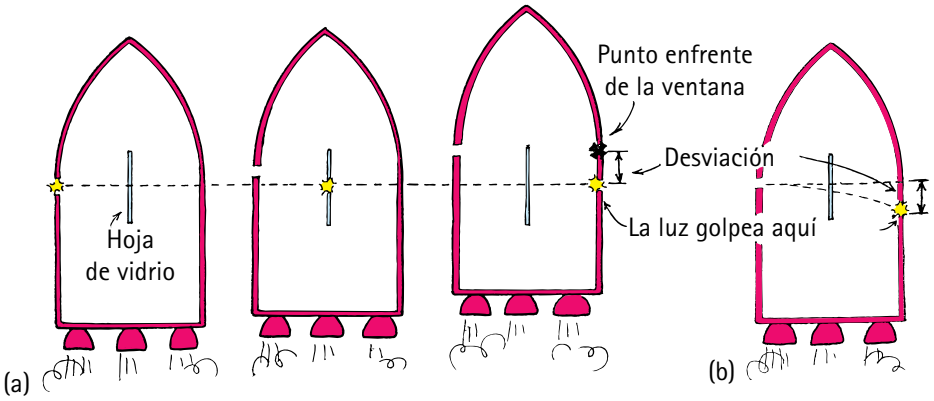



**FIGURA 36.5**
(a) Un observador externo ve que la luz viaja horizontalmente en línea recta, y, al igual que la bola de la figura anterior, golpea la pared de enfrente de la ventana un poco por debajo de un punto.
(b) Para un observador interno, la luz se dobla como si respondiera a un campo gravitacional.

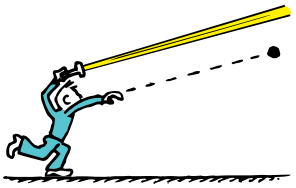


**FIGURA 36.6**
La trayectoria de un haz de luz proveniente de una linterna es idéntica a la trayectoria que tendría una pelota de béisbol si pudiera "lanzarse" con la rapidez de la luz. Ambas trayectorias se curvan por igual en un campo gravitacional uniforme.

Un observador en el interior de la nave siente "gravedad" debido a la aceleración de la nave. El observador no se sorprende por la desviación de la bola lanzada, pero puede sorprenderse mucho por la desviación de la luz. De acuerdo con el principio de equivalencia, si la luz se desvía por la aceleración, debe desviarse por la gravedad. Sin embargo, ¿cómo es que la gravedad puede doblar la luz? De acuerdo con la física de Newton, la gravitación es una interacción entre masas; una bola en movimiento se curva debido a la interacción entre su masa y la masa de la Tierra. Pero, ¿qué hay de la luz, que es energía pura y no tiene masa? La respuesta de Einstein fue que la luz puede no tener masa, pero no "carece de energía". La gravedad tira sobre la energía de la luz porque la energía es equivalente a la masa.

Ésta fue la primera respuesta de Einstein, antes de desarrollar por completo la teoría de la relatividad general. Después, dio una explicación más profunda: que la luz se dobla cuando viaja en una geometría espacio-tiempo que se dobla. Después, en este capítulo, verás que la presencia de una masa resulta en el doblamiento o deformación del espacio-tiempo. La masa de la Tierra es muy pequeña para deformar de manera considerable el espacio-tiempo circundante, que es prácticamente plano, de modo que cualquier doblamiento de la luz en el ambiente inmediato normalmente no se detecta. Sin embargo, cerca de los cuerpos con masa mucho mayor que la de la Tierra, el doblamiento de la luz es tan grande que puede detectarse.

Einstein predijo que la luz estelar que pasa cerca del Sol se desviaría en un ángulo de 1.75 segundos de arco —suficientemente grande como para medirlo—. Aunque las estrellas no son visibles cuando el Sol está en el cielo, la desviación de la luz estelar puede observarse durante un eclipse de Sol. (La medición de esta desviación se ha vuelto una práctica habitual en cada eclipse total desde que se realizaron las primeras mediciones durante el eclipse total de 1919.) Una fotografía de un cielo oscurecido alrededor del Sol eclipsado revela la presencia de las brillantes estrellas cercanas. Las posiciones de las estrellas se comparan con las de otras fotografías de la misma área tomadas en otros momentos en la noche con el mismo telescopio. En todos los casos, la desviación de la luz estelar sustenta la predicción de Einstein (Figura 36.7).

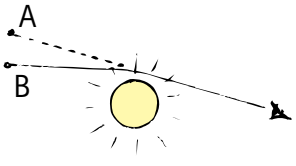



**FIGURA 36.7**
La luz estelar se dobla cuando roza al Sol. El punto A muestra la posición aparente; el punto B muestra la posición verdadera.

La luz también se dobla en el campo gravitacional de la Tierra, pero no tanto. Uno no lo aprecia porque el efecto es muy pequeño. Por ejemplo, en un campo gravitacional constante de 1 *g*, un haz de luz dirigida horizontalmente "caerá" una distancia vertical de 4.9 m en 1 s (tal como lo haría una pelota de béisbol), pero recorrerá una distancia horizontal de 300,000 km en ese tiempo. Su curva difícilmente se aprecia cuando estás así de lejos del punto de partida. Pero si la luz recorriera 300,000 km en

múltiples reflexiones entre espejos paralelos idealizados, el efecto sería bastante notorio (Figura 36.8). (Hacer esto sería un genial proyecto doméstico para créditos adicionales, como ganar créditos para un doctorado.)

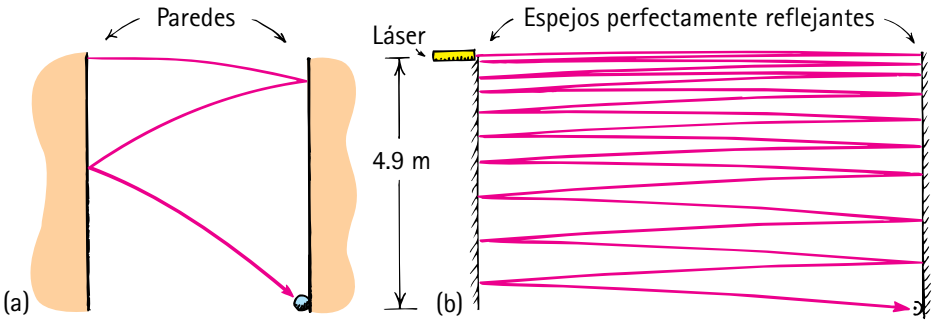



**FIGURA 36.8**
(a) Si una bola se lanza horizontalmente entre un par vertical de paredes paralelas, rebotará de ida y vuelta y caerá una distancia vertical de 4.9 m en 1 s.
(b) Si un haz horizontal de luz se dirige entre un par vertical de espejos ideales perfectamente paralelos, se reflejará de ida y vuelta y caerá una distancia vertical de 4.9 m en 1 s. El número de reflexiones de ida y vuelta se simplifica sobremanera en el diagrama; si los espejos estuvieran separados 300 km, por ejemplo, 1,000 reflexiones ocurrirían en 1 s.

**PUNTO DE CONTROL**

1. **¡Hala! Aprendiste que el jalón de la gravedad es una interacción entre masas. Y aprendiste que la luz no tiene masa. Ahora se dice que la luz puede doblarse por la gravedad. ¿No es esto una contradicción?**
2. **¿Por qué no percibes el doblamiento de la luz en el entorno cotidiano?**

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

1. No hay contradicción cuando la equivalencia masa-energía se entiende. Es cierto que la luz no tiene masa, pero no "carece de energía". El hecho de que la gravedad desvía la luz demuestra que la gravedad "jala" la energía de la luz. De hecho, ¡la energía es equivalente a la masa!
2. Sólo porque la luz viaja muy rápido; así como, en una distancia corta, no aprecias la trayectoria curvada de una bala con gran rapidez, no percibes la curvatura de un haz de luz.

## 36.3 Gravedad y tiempo: corrimiento gravitacional al rojo

De acuerdo con la teoría de la relatividad general de Einstein, la gravitación hace que el tiempo corra lento. Si te mueves en la dirección en la que la fuerza gravitacional actúa (de lo alto de un rascacielos al suelo, por ejemplo, o de la superficie de la Tierra al fondo de un pozo) el tiempo correrá más lento en el punto al que llegas que en el punto de donde partiste. Para entender que los relojes se atrasen por la gravedad puedes aplicar el principio de equivalencia y la dilatación del tiempo a un marco de referencia acelerado.

Imagina el marco de referencia acelerado como un gran disco giratorio. Supón que mides el tiempo con tres relojes idénticos: uno colocado en el centro del disco, un segundo colocado en la orilla del disco y el tercero en reposo en el suelo cercano (Figura 36.9). De acuerdo con las leyes de la relatividad especial, se sabe que el reloj del centro, dado que no se mueve con respecto al suelo, debe correr a la misma razón que el reloj del suelo, mas no a la misma razón que el reloj de la orilla del disco. El reloj de la orilla está en movimiento con respecto al suelo y, por tanto, debe observarse que funciona más lento que el reloj del suelo y, en consecuencia, más lento que el reloj del centro del disco. Aunque los relojes en el disco están unidos al mismo marco de referencia, no corren de manera sincronizada; el reloj exterior corre más lento que el reloj interior.

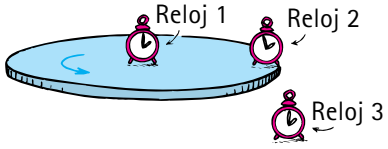



**FIGURA 36.9**
Los relojes 1 y 2 están en un disco acelerado, y el reloj 3 está en reposo en un marco inercial. Los relojes 1 y 3 corren a la misma tasa, mientras que el reloj 2 corre más lento. Desde el punto de vista de un observador en el reloj 3, el reloj 2 corre lento debido a su movimiento. Desde el punto de vista de un observador en el reloj 1, el reloj 2 corre lento porque está a un potencial menor (se necesitaría trabajo para moverlo de la orilla al centro).

Un observador sobre el disco giratorio y un observador en reposo en el suelo ven ambos la misma diferencia en las razones de los relojes entre ellos mismos y el reloj de la orilla. Sin embargo, cada uno de los observadores interpreta la diferencia de un modo distinto. Para el observador en el suelo, la razón más lenta del reloj de la orilla se debe a su movimiento. Pero, para el observador en el disco giratorio, los relojes del disco no están en movimiento uno con respecto al otro; más bien, una fuerza centrífuga actúa sobre el reloj de la orilla, mientras que tal fuerza no actúa sobre el reloj del centro. Es probable que el observador en el disco concluya que la fuerza centrífuga tiene algo que ver con que el tiempo corra lento. Él observa que, cuando se mueve en la dirección de la fuerza centrífuga, del centro a la orilla del disco, el tiempo es más lento. Al aplicar el principio de equivalencia, que dice que cualquier efecto de la aceleración puede reproducirse por la gravedad, debes concluir que, cuando te mueves en la dirección en la que actúa la fuerza gravitacional, el tiempo también será más lento.

Esta lentitud se aplicará a todos los "relojes", ya sean físicos, químicos o biológicos. Una ejecutiva que trabaje en la planta baja de un alto rascacielos envejecerá con más lentitud que su hermana gemela que trabaja en el último piso. La diferencia es muy pequeña, sólo de algunas millonésimas de segundo por década, porque, según estándares cósmicos, la distancia es pequeña y la gravitación es débil. En el caso de diferencias más grandes en la gravitación, como las que hay entre la superficie del Sol y la superficie de la Tierra, las diferencias en tiempo son mayores (aunque todavía pequeñas). Un reloj en la superficie del Sol debe correr considerablemente más lento que un reloj en la superficie de la Tierra. Años antes de concluir su teoría de la relatividad general, Einstein sugirió una forma de medir esto cuando formuló el principio de equivalencia en 1907.

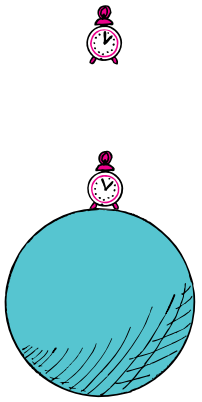


**FIGURA 36.10**
Si te mueves de un punto distante hacia la superficie de la Tierra, te mueves en la dirección en la que actúa la fuerza gravitacional: hacia una ubicación en donde los relojes corren más lento. Un reloj en la superficie de la Tierra corre más lento que un reloj lejos de ella.

Los astrofísicos no sólo describen cómo se ve el cielo, sino que explican cómo es que llegó a ser como es.

Todos los átomos emiten luz a frecuencias específicas características de la tasa vibratoria de los electrones en el interior del átomo. Por lo tanto, todo átomo es un "reloj" y la vibración atómica más lenta indica el enlentecimiento de tales relojes. Un átomo en el Sol debe emitir luz de una frecuencia más baja (vibración más lenta) que la luz emitida por el mismo elemento en la Tierra. Dado que la luz roja está en el extremo de la frecuencia baja del espectro visible, una reducción de frecuencia corre el color hacia el rojo. Este efecto se llama **corrimiento al rojo gravitacional**. El corrimiento al rojo gravitacional se observa en la luz proveniente del Sol, pero hay varias influencias perturbadoras que impiden hacer mediciones exactas de este pequeño efecto. No fue sino hasta 1960 cuando una técnica completamente nueva, que utiliza rayos gamma provenientes de átomos radiactivos, permitió realizar mediciones increíblemente precisas que confirmaban el enlentecimiento gravitacional del tiempo entre el último y el primer piso de un edificio de laboratorios de la Harvard University.[1]

[1]A finales de la década de 1950, poco después de la muerte de Einstein, el físico alemán Rudolph Mössbauer descubrió un importante efecto en la física nuclear que ofrece un método extremadamente exacto de usar los núcleos atómicos como relojes atómicos. El *efecto Mössbauer*, por el cual su descubridor ganó el Premio Nobel, tiene muchas aplicaciones prácticas. A finales de 1959, Robert Pound y Glen Rebka, de la Harvard University, concibieron una aplicación que ponía a prueba la relatividad general y realizaron el experimento de confirmación.

De modo que las mediciones del tiempo dependen no sólo del movimiento relativo, como aprendiste en el Capítulo 35, sino también de la gravedad. En la relatividad especial, la dilatación del tiempo depende de la *rapidez* de un marco de referencia en relación con otro. En la relatividad general, el corrimiento al rojo gravitacional depende de la *ubicación* de un punto en un campo gravitacional en relación con otro. Visto desde la Tierra, un reloj se juzgará que hace tictac con más lentitud sobre la superficie de una estrella que sobre la Tierra. Si la estrella se encoge, su superficie se mueve hacia adentro, hacia una gravedad cada vez más intensa, lo cual hace que el tiempo en su superficie se haga cada vez más lento. Deberían medirse intervalos más largos entre los tictac del reloj estelar. Pero si las mediciones del reloj estelar las haces desde la misma estrella, no observarás nada raro en el funcionamiento del reloj.

Supón, por ejemplo, que un voluntario indestructible está de pie sobre la superficie de una estrella gigante que comienza a colapsar. Tú, como observador externo, observarás un progresivo enlentecimiento del tiempo en el reloj del voluntario a medida que la superficie de la estrella retroceda a regiones de gravedad más intensa. Sin embargo, el voluntario no percibe diferencia alguna en su propio tiempo. Ve los eventos dentro de su propio marco de referencia y no percibe nada extraño. A medida que la estrella que colapsa se encoge con tendencia a convertirse en un agujero negro y el tiempo avanza normalmente desde el punto de vista del voluntario, tú en el exterior percibes que el tiempo del voluntario se aproxima a un alto total; lo ves congelarse en el tiempo con un intervalo de tiempo infinito entre los tictac de su reloj o los latidos de su corazón. Desde tu punto de vista, su tiempo se detiene por completo. El corrimiento al rojo gravitacional, en lugar de ser un efecto pequeño, es dominante.

Puedes entender el corrimiento al rojo gravitacional desde otro punto de vista: en términos de la fuerza gravitacional que actúa sobre los fotones. Conforme un fotón vuela de la superficie de una estrella, se "retarda" por la gravedad de la estrella. Pierde energía (mas no rapidez). Dado que la frecuencia de un fotón es proporcional a su energía, su frecuencia disminuye a medida que su energía disminuye. Cuando observas el fotón, ves que tiene una frecuencia menor de la que tendría si se hubiera emitido por una fuente menos masiva. Su tiempo se enlenteció, como el tictac de un reloj se hace más lento. En el caso de un agujero negro, un fotón es incapaz de escapar en absoluto. Pierde toda su energía y toda su frecuencia en el intento. Su frecuencia corre al rojo gravitacional hasta ser cero, lo que es congruente con tu observación de que la tasa a la que el tiempo pasa en una estrella que colapsa tiende a cero.

Es importante señalar la naturaleza relativista del tiempo tanto en la relatividad especial como en la relatividad general. En ambas teorías, no hay forma de extender la duración de tu propia existencia. Otros que se muevan con diferentes rapideces o en distintos campos gravitacionales podrían atribuirte una gran longevidad, pero tu longevidad es vista desde *sus* marcos de referencia, nunca desde el tuyo. Los cambios en el tiempo siempre se atribuyen al otro.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) debe tener en cuenta el efecto de la gravedad, así como la rapidez de los relojes atómicos en órbita. Debido a la gravedad, los relojes operan más rápido en órbita. Debido a la rapidez, corren más lento. Los efectos varían durante cada órbita elíptica y no se cancelan. Cuando tu unidad de GPS te indica exactamente dónde estás, agradéceselo a Einstein.

**PUNTO DE CONTROL**

**¿Una persona en lo alto de un rascacielos envejecerá más rápido o más lento que una persona en la planta baja?**

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Más rápido. Ir de lo alto del rascacielos a la planta baja es ir en la dirección de la fuerza gravitacional, de modo que es ir hacia un lugar donde el tiempo corre más lento.

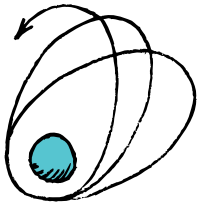


**FIGURA 36.11**
Una órbita elíptica en precesión.

## 36.4 Gravedad y espacio: el movimiento de Mercurio

A partir de la teoría de la relatividad especial se sabe que las mediciones de espacio y tiempo experimentan transformaciones cuando se involucra el movimiento. Lo mismo sucede con la teoría general: las mediciones del espacio difieren en campos gravitacionales distintos, por ejemplo, cerca y lejos del Sol.

Los planetas orbitan el Sol y las estrellas en órbitas elípticas y se mueven de manera periódica hacia regiones más alejadas del Sol y más cercanas al Sol. Einstein dirigió su atención hacia los campos gravitacionales variables que experimentan los planetas que orbitan el Sol y descubrió que las órbitas elípticas de los planetas deben tener una *precesión* (Figura 36.11), independientemente de la influencia newtoniana de otros planetas. Cerca del Sol, donde el efecto de la gravedad sobre el tiempo es el más grande, la tasa de precesión debe ser la más alta; lejos del Sol, donde el tiempo es menos afectado, cualquier desviación de la mecánica newtoniana debe ser prácticamente imperceptible.

Mercurio, el planeta más cercano al Sol, está en la parte más intensa del campo gravitacional del Sol. Si la órbita de algún planeta muestra una precesión mensurable, debe ser Mercurio, y el hecho de que la órbita de Mercurio sí tenga precesión, por encima de los efectos atribuibles a los demás planetas, ha sido un misterio para los astrónomos desde comienzos del siglo XIX. Mediciones cuidadosas demostraron que la órbita de Mercurio tiene una precesión de aproximadamente 574 segundos de arco por siglo. Se descubrió que las perturbaciones de los demás planetas explicaban todo, menos 43 segundos de arco por siglo. Incluso después de aplicar todas las correcciones conocidas debidas a posibles perturbaciones por otros planetas, los cálculos de físicos y astrónomos no lograban explicar los 43 segundos de arco adicionales. O bien, Venus era extramasivo o un planeta nunca descubierto (llamado Vulcano) jalaba sobre Mercurio. Y entonces llegó la explicación de Einstein, ¡cuyas ecuaciones de campo de la relatividad general aplicadas a la órbita de Mercurio predicen 43 segundos de arco adicionales por siglo!

Una hipótesis incorrecta, tratada rigurosamente, en ocasiones puede producir más información nueva y útil que una observación sin guía.

El misterio de la órbita de Mercurio se solucionó, y se reconoció una nueva teoría de la gravedad. La ley de gravitación de Newton, que se había mantenido en pie como un pilar inamovible de la ciencia durante más de dos siglos, resultó ser un caso especial en el límite de la teoría más general de Einstein. Si los campos gravitacionales son comparativamente débiles, la ley de Newton resulta ser una buena aproximación de la nueva ley, tanto así que la ley de Newton, con la que es más fácil de trabajar matemáticamente, es la ley que los científicos espaciales de hoy usan la mayor parte del tiempo.

## 36.5 Gravedad, espacio y una nueva geometría

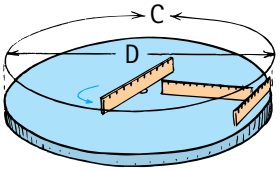



**FIGURA 36.12**
Un metro a lo largo de la orilla del disco giratorio se ve contraído, mientras que un metro más alejado y con un movimiento más lento no se contrae tanto. Un metro a lo largo del radio no se contrae en absoluto. Cuando el disco no gira, C/D = $\pi$, pero cuando el disco gira, C/D no es igual a $\pi$ y la geometría euclidiana ya no es válida. Lo mismo ocurre en un campo gravitacional.

Puedes comenzar a entender que las mediciones del espacio se alteran en un campo gravitacional si piensas de nuevo en el marco de referencia acelerado del disco giratorio. Supón que mides la circunferencia del borde exterior con un metro. Recuerda la contracción de Lorentz de la relatividad especial: el metro parecerá contraído para cualquier observador que no se mueva junto con él, mientras que las dimensiones de un metro idéntico que se mueva mucho más lento cerca del centro casi no serán afectadas (Figura 36.12). Todas las mediciones de distancia a lo largo de un *radio* del disco giratorio no deben afectarse en absoluto por el movimiento, porque el movimiento es perpendicular al radio. Debido a que sólo las mediciones de distancia paralelas a y alrededor de la circunferencia son afectadas, la razón de la circunferencia con respecto al diámetro cuando el disco gira ya no es la constante fija $\pi$ (3.14159...) sino una variable que depende de la rapidez angular y el diámetro del disco.

De acuerdo con el principio de equivalencia, el disco giratorio es equivalente a un disco estacionario que tiene un campo gravitacional intenso cerca de su borde y un campo gravitacional progresivamente más débil hacia su centro. Las mediciones de

distancia, entonces, dependerán de la intensidad del campo gravitacional (o, más exactamente, para entusiastas de la relatividad, del potencial gravitacional), aun cuando no haya ningún movimiento relativo. La gravedad hace que el espacio sea no-euclidiano; las leyes de la geometría euclidiana que se enseñan en bachillerato ya no son válidas cuando se aplican a objetos en presencia de campos gravitacionales intensos.

Las conocidas reglas de la geometría euclidiana son apropiadas para varias figuras que puedes dibujar sobre una superficie plana. La razón de la circunferencia de un círculo con respecto a su diámetro es igual a $\pi$, todos los ángulos en un triángulo suman 180° y la distancia más corta entre dos puntos es una línea recta. Las reglas de la geometría euclidiana son válidas en el espacio plano, pero si dibujas estas figuras sobre una superficie curva, como una esfera o un objeto con forma de silla de montar, las reglas euclidianas ya no funcionan (Figura 36.13). Si mides la suma de los ángulos de un triángulo en el espacio, llamas al espacio "plano" si la suma es igual a 180°, esférico o positivamente curvo si la suma es mayor que 180°, y con forma de silla de montar o negativamente curvo si la suma es menor que 180°.

El modelo de cosmología (la ciencia del universo) aceptado en la actualidad supone un universo plano dominado por materia oscura y energía oscura que se formaron por el rápido hinchamiento desde sus densos orígenes calientes.

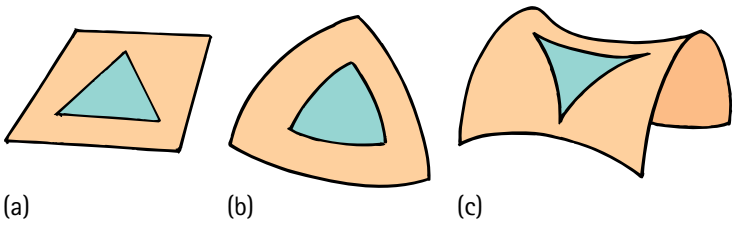



**FIGURA 36.13**
La suma de los ángulos de un triángulo depende del tipo de superficie sobre la cual se dibuje el triángulo. (a) En una superficie plana, la suma es 180°. (b) En una superficie esférica, la suma es mayor que 180°. (c) En una superficie con forma de silla de montar, la suma es menor que 180°.

Desde luego, las líneas que forman los triángulos de la Figura 36.13 no son todas "rectas" desde una visión tridimensional, pero son las distancias "más rectas", o *más cortas*, entre dos puntos si estás confinado a la superficie curva. Estas líneas de distancia más corta se llaman líneas *geodésicas*, o simplemente **geodésicas**.

La trayectoria de un haz de luz sigue una geodésica. Imagina que tres experimentadores en la Tierra, Venus y Marte, miden los ángulos de un triángulo formado por los haces de luz que viajan entre estos tres planetas cuando no están todos del mismo lado del Sol (Figura 36.14). Los haces de luz se doblan cuando pasan al lado del Sol, lo que resulta en que la suma de los tres ángulos sea mayor que 180°. De modo que el espacio alrededor del Sol es positivamente curvo. Los planetas que orbitan al Sol viajan a lo largo de geodésicas tetradimensionales en este espacio-tiempo con curva positiva. Los objetos, satélites y rayos de luz que caen libremente viajan todos a lo largo de geodésicas en el espacio-tiempo tetradimensional.

"Pequeñas" partes del Universo ciertamente son curvas. ¿Y qué hay del Universo en su totalidad? Estudios recientes de la radiación de temperatura baja en el espacio, que es un remanente del Big Bang, sugiere que el Universo a gran escala es plano. Si tuviera un extremo abierto como la silla de montar de la Figura 36.13c, se extendería por siempre y los haces de luz que parten paralelos divergirían. Si estuviera cerrado como la superficie esférica de la Figura 36.13b, los haces de luz que partieran paralelos con el tiempo se cruzarían y harían círculos de vuelta a su punto de partida. En tal Universo, si pudieras mirar infinitamente en el espacio con un telescopio ideal, ¡verías la parte de atrás de tu cabeza (después de esperar pacientemente durante algunos miles de millones de años)! En el actual Universo plano, los haces paralelos de luz siguen siendo paralelos y nunca regresarán.

La relatividad general exige una nueva geometría: en lugar de que el espacio sólo sea una región de la nada, el espacio es un medio flexible que puede doblarse y torcerse. La forma en que se dobla y se tuerce la describe un campo gravitacional. La relatividad general es una geometría de un espacio-tiempo curvo tetradimensional.[2] La matemática de esta geometría es imponente y no podría presentarse aquí. Sin embargo, la esencia es

**pti**

- La geometría del Universo puede indicar su destino final. Un Universo esférico tiene suficiente masa-energía como para, a la larga, dejar de expandirse y contraerse: un "Big Crunch", lo opuesto del "Big Bang". Un Universo con forma de silla de montar tiene muy poca masa-energía para alguna vez frenar su expansión hasta detenerse. Un Universo plano tiene muy poca masa-energía para alguna vez dejar de expandirse.

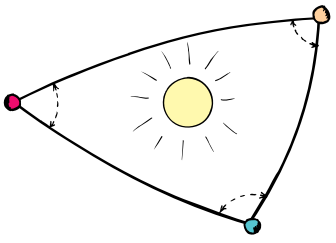


**FIGURA 36.14**
Los rayos de luz que unen a los tres planetas forman un triángulo. Dado que la luz que pasa cerca del Sol se dobla, la suma de los ángulos del triángulo resultante es mayor que 180°.

[2]No te desanimes si no puedes imaginar el espacio-tiempo tetradimensional. El mismo Einstein solía decir a sus amigos: "No lo intenten. Yo tampoco puedo hacerlo". ¡Quizás no seas muy diferente de los grandes pensadores de la época de Galileo que no podían imaginar que la Tierra se moviera!

que la presencia de masa produce la curvatura, o *deformación*, del espacio-tiempo. Por el contrario, una curvatura del espacio-tiempo muestra que una masa debe estar presente. En lugar de imaginar las fuerzas gravitacionales entre las masas, abandona por completo la noción de fuerza y en su lugar piensa en las masas que responden en su movimiento a la deformación del espacio-tiempo donde habitan. Las protuberancias, depresiones y deformaciones del espacio-tiempo geométrico *son* los fenómenos de la gravedad.

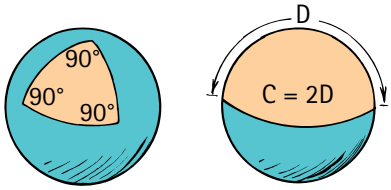



**FIGURA 36.15**
La geometría de la superficie curva de la Tierra difiere de la geometría euclidiana del espacio plano. Observa, en el globo a la izquierda, que la suma de los ángulos de un triángulo equilátero, en el que cada lado es igual a ¼ la circunferencia de la Tierra, evidentemente es mayor que 180°. El globo de la derecha muestra que la circunferencia de la Tierra sólo es el doble de su diámetro y no 3.14 veces su diámetro. La geometría euclidiana tampoco es válida en el espacio curvo.

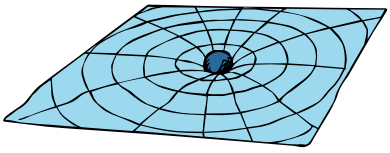


**FIGURA 36.16**
Una analogía bidimensional del espacio-tiempo tetradimensional deformado. El espacio-tiempo cerca de una estrella se curva en una forma similar a la superficie de una cama de agua cuando una bola pesada descansa sobre ella.

No puedes visualizar las protuberancias y depresiones tetradimensionales en el espacio-tiempo porque eres un ser tridimensional. Puedes vislumbrar esta deformación si piensas en una analogía simplificada en dos dimensiones: una bola pesada descansa en medio de una cama de agua. Mientras más masiva sea la bola, mayor es la abolladura o deformación de la superficie bidimensional. Una canica que ruede por la cama, pero lejos de la bola, rodará en una trayectoria relativamente recta, mientras que una canica que ruede cerca de la bola se curvará cuando ruede por la superficie abollada. Si la curva se cierra sobre sí misma, su forma se asemeja a una elipse. Los planetas que orbitan el Sol igualmente viajan a lo largo de geodésicas tetradimensionales en el espacio-tiempo deformado en torno al Sol.

## 36.6 Ondas gravitacionales

Todo objeto tiene masa y, por tanto, deforma el espacio-tiempo circundante. Cuando un objeto experimenta un cambio en su movimiento —una aceleración— la deformación circundante se mueve con la finalidad de reajustarse a la nueva posición. Estos reajustes producen ondas en la geometría global del espacio-tiempo. Esto es similar a mover una bola que descansa sobre la superficie de una cama de agua. Una perturbación viaja por la superficie de la cama de agua en forma de ondas; si mueves una bola más masiva, entonces obtienes una mayor perturbación y se producen ondas incluso más intensas. Lo mismo ocurre con el espacio-tiempo en el Universo. Ondas similares viajan hacia afuera desde una fuente gravitacional con la rapidez de la luz y son **ondas gravitacionales**.

Cualquier objeto acelerado produce una onda gravitacional. En general, cuanto más masivo sea el objeto y mayor su aceleración, más intensa es la onda gravitacional resultante. Pero incluso las ondas más intensas producidas por eventos astronómicos habituales son en extremo débiles, las más débiles conocidas en la naturaleza. Por ejemplo, las ondas gravitacionales emitidas por una carga eléctrica en vibración son un trillón de trillones de veces más débiles que las ondas electromagnéticas emitidas por la misma carga. Detectar ondas gravitacionales es muy difícil, y no hubo ninguna detección confirmada sino hasta 2014, cuando un equipo de investigadores encabezados por el astrofísico John Kovak, del Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics observó un patrón de polarización en la radiación de fondo cósmico probablemente causado por ondas gravitacionales en el mismísimo comienzo del Universo, lo que brinda sustento a la hipótesis inicial del Universo que se infla y el Big Bang. ¡Un descubrimiento fascinante!

Por débiles que sean, las ondas gravitacionales están en todas partes. Sacude la mano: acabas de producir una onda gravitacional. No es muy intensa, pero existe.

**pti**

- Una de las predicciones de la relatividad general es una torsión sutil del espacio-tiempo alrededor de un objeto giratorio masivo. Una prueba de este efecto de "arrastre de marco" serían los pequeños cambios predecibles en las orientaciones de las órbitas de los satélites y giroscopios en órbita. Los investigadores en 2004 descubrieron esta evidencia confirmadora.

El espacio se estira y lleva consigo a las galaxias. La luz visible del Universo temprano se ha estirado para ahora ser radiación de microondas con una longitud de onda relativamente larga.

## 36.7 Gravitación newtoniana y einsteiniana

Cuando Einstein formuló su nueva teoría de la gravitación, se dio cuenta de que, si su teoría era válida, sus ecuaciones de campo debían reducirse a las ecuaciones newtonianas de la gravitación en el límite de un campo débil. Demostró que la ley de gravitación de Newton es un caso especial de la teoría más amplia de la relatividad. La ley de gravitación de Newton sigue siendo una descripción exacta de la mayor parte de las interacciones entre los cuerpos del sistema solar y más allá. Gracias a la ley de Newton uno puede calcular las órbitas de cometas y asteroides e incluso predecir la existencia de planetas no descubiertos. Incluso hoy, cuando se calculan las trayectorias de las sondas espaciales hacia la Luna y otros planetas, sólo se usa la teoría newtoniana común. Esto se debe a que el campo gravitacional de estos cuerpos es muy débil y, desde el punto de vista de la relatividad general, el espacio-tiempo circundante en esencia es plano. Pero para regiones de gravitación más intensa, donde el espacio-tiempo es mucho más curvo, la teoría newtoniana no puede explicar de manera adecuada los diversos fenómenos, como la precesión de la órbita de Mercurio cerca del Sol y, en el caso de campos más intensos, el corrimiento al rojo gravitacional y otras distorsiones aparentes en las mediciones del espacio y del tiempo. Estas distorsiones llegan a su límite en el caso de una estrella que colapsa en un agujero negro, donde el espacio-tiempo se dobla por completo sobre sí mismo. Sólo la gravitación einsteiniana alcanza este dominio.

En el Capítulo 32 se vio que la física newtoniana se une en un extremo con la teoría cuántica, cuyo dominio es lo muy ligero y muy pequeño: partículas diminutas y átomos. Y ahora has visto que la física newtoniana se une en el otro extremo con la teoría de la relatividad, cuyo dominio es lo muy masivo y muy grande. Tú no ves el mundo como lo vieron los antiguos egipcios, griegos o chinos. Es poco probable que las personas en el futuro vean el Universo como lo ves tú ahora. La visión actual del Universo puede ser muy limitada, y quizás llena de conceptos erróneos, pero seguramente es más clara que la visión de quienes te antecedieron. La visión actual surge de los hallazgos de Copérnico, Galileo, Newton y, en fecha más reciente, Einstein, hallazgos que muy a menudo fueron rebatidos sobre la base de que minimizaban la importancia de los seres humanos en el Universo. En el pasado, ser importante significaba haberse criado por encima de la naturaleza: apartarse de la naturaleza. Desde entonces, para ampliar esta idea se ha necesitado un enorme esfuerzo, una observación esmerada y un incansable deseo por comprender el entorno. Si se ve desde la manera como se comprende en la actualidad el Universo, se descubre la importancia de formar parte de la naturaleza, no de estar separado de ella. Tú eres parte de la naturaleza que, cada vez más, se está volviendo consciente de sí misma.

**pti**

- En 2005 los investigadores confirmaron las predicciones de las pérdidas de energía debidas a las ondas gravitacionales emitidas por el sistema de doble pulsar PSR J0737-3039A/B durante un periodo de tres años. ¡Hurra, Einstein!

Si el primer curso de física de un alumno es divertido, el rigor de un segundo curso será bien recibido y significativo.

## RESUMEN DE TÉRMINOS (CONOCIMIENTO)

**Teoría de la relatividad general.** La segunda de las teorías de relatividad de Einstein, que relaciona la gravedad con las propiedades del espacio y el tiempo.

**Principio de equivalencia.** Puesto que las observaciones hechas en un marco de referencia acelerado son indistinguibles de las observaciones hechas en un campo gravitacional, cualquier efecto producido por la gravedad puede duplicarse si se acelera el marco de referencia.

**Corrimiento al rojo gravitacional.** El alargamiento de las ondas de radiación electromagnética que escapan de un objeto masivo.

**Geodésica.** La trayectoria más corta entre dos puntos en varios modelos del espacio.

**Onda gravitacional.** Perturbación gravitacional, generada por una masa con aceleración, que se propaga por el espacio-tiempo.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES (COMPRENSIÓN)

### 36.1 Principio de equivalencia

1. ¿Cuál es la principal diferencia entre la teoría de la relatividad especial y la teoría de la relatividad general?
2. En una nave espacial que acelera a $g$, lejos de la gravedad de la Tierra, ¿cómo se compara el movimiento de una bola que se suelta, con el movimiento de una bola que se suelta en la superficie de la Tierra?
3. ¿Exactamente qué es *equivalente* en el principio de equivalencia?

### 36.2 Doblamiento de la luz por la gravedad

4. Compara el doblamiento de las trayectorias de pelotas de béisbol y fotones por un campo gravitacional.
5. ¿Por qué el Sol debe eclipsarse para medir la desviación de la luz estelar que pasa cerca del Sol?

### 36.3 Gravedad y tiempo: corrimiento gravitacional al rojo

6. ¿Cuál es el efecto de una gravitación intensa sobre las mediciones del tiempo?
7. ¿Cuál corre más lento: un reloj en lo alto del rascacielos más alto de Chicago, o un reloj en la playa del lago Michigan?
8. ¿Cómo se compara la frecuencia de una línea espectral particular observada en luz solar, con la frecuencia de dicha línea observada desde una fuente en la Tierra?
9. Si ves los eventos que ocurren en una estrella que colapsa para convertirse en agujero negro, ¿ves que el tiempo se acelera o se hace lento?

### 36.4 Gravedad y espacio: el movimiento de Mercurio

10. De todos los planetas, ¿por qué Mercurio es el mejor candidato para encontrar evidencia de la relación entre la gravitación y el espacio?
11. ¿Para qué tipo de campo gravitacional es válida la ley de Newton?

### 36.5 Gravedad, espacio y una nueva geometría

12. Un metro colocado a lo largo de la circunferencia de un disco giratorio parecerá contraído, pero si se orienta a lo largo de un radio, no lo parecerá. Explica.
13. La razón de la circunferencia con respecto al diámetro para círculos medidos sobre un disco es igual a $\pi$ cuando el disco está en reposo, pero no cuando el disco gira. Explica.
14. ¿Qué efecto tiene la masa sobre el espacio-tiempo?

### 36.6 Ondas gravitacionales

15. ¿Qué ocurre en el espacio circundante cuando un objeto masivo experimenta un cambio en su movimiento?
16. Una estrella a 10 años-luz de distancia explota y produce ondas gravitacionales. ¿Cuánto tardarán dichas ondas en llegar a la Tierra?
17. ¿Por qué las ondas gravitacionales son tan difíciles de detectar?

### 36.7 Gravitación newtoniana y einsteiniana

18. ¿La teoría de gravitación de Einstein invalida la teoría de gravitación de Newton? Explica.
19. ¿La física newtoniana es adecuada para llevar un cohete a la Luna?
20. ¿Cómo se vincula la física newtoniana con la teoría cuántica y con la teoría de la relatividad?

## PIENSA Y EXPLICA (SÍNTESIS)

21. ¿Qué es diferente acerca de los marcos de referencia que se aplican a la relatividad especial y a la relatividad general?
22. Una astronauta despierta en su cápsula cerrada, que en realidad se asienta en la Luna. ¿Ella puede decir si su peso es el resultado de la gravitación o del movimiento acelerado? Explica.
23. Ofrece una explicación clásica para el caso de un astronauta en una nave espacial en órbita que no experimenta ninguna fuerza neta (medida por una báscula), aun cuando el astronauta esté en manos de la gravedad terrestre.
24. En una nave espacial lejos del alcance de la gravedad, ¿bajo qué condiciones podrías sentir como si la nave estuviera estacionaria sobre la superficie de la Tierra?
25. ¿Qué ocurre con la distancia de separación entre dos personas si ambas caminan hacia el norte con la misma razón desde dos ubicaciones en el ecuador de la Tierra? Y, sólo por diversión, ¿en qué lugar del mundo un paso en cualquier dirección es un paso hacia el sur?
26. Tú percibes con facilidad el doblamiento de la luz por reflexión y refracción, pero, ¿por qué no te percatas del doblamiento de la luz por la gravedad?
27. La luz *sí* se dobla en un campo gravitacional. ¿Por qué este doblamiento no lo tienen en cuenta los topógrafos que usan haces de luz láser como líneas rectas?
28. ¿Por qué se dice que la luz viaja en líneas rectas? ¿Es estrictamente exacto decir que un haz de láser proporciona una línea perfectamente recta para fines de topografía? Explica.
29. Tu amigo dice que la luz que pasa al lado del Sol se dobla ya sea que la Tierra experimente un eclipse solar o no. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo, y por qué?
30. En 2004, cuando Mercurio pasó entre el Sol y la Tierra, la luz solar no se dobló de manera considerable mientras pasaba al lado de Mercurio. ¿Por qué?
31. Una puesta de Sol se ve distorsionada en la Tierra, pero no para los astronautas en la Luna. ¿Qué causa esta distorsión? (¿Por qué esta pregunta pudo haberse planteado en el Capítulo 28?)

32. Al final de 1 s, una bala disparada en sentido horizontal en un campo gravitacional de 1 *g*, cae una distancia vertical de 4.9 m desde su trayectoria que sería recta sin el campo. ¿Qué distancia caería un haz de luz desde su trayectoria en línea recta si viajara en un campo uniforme de 1 *g* durante 1 s? ¿Durante 2 s?
33. La luz cambia su energía cuando "cae" en un campo gravitacional. Sin embargo, este cambio de energía no se demuestra con un cambio de rapidez. ¿Cómo se demuestra este cambio de energía?
34. ¿Apreciarías un enlentecimiento o una aceleración de un reloj si lo llevaras contigo al fondo de un pozo profundo?
35. Si atestiguas eventos que ocurren en la Luna, donde la gravitación es más débil que en la Tierra, ¿esperarías ver un corrimiento al rojo gravitacional o un corrimiento al azul gravitacional? Explica.
36. ¿Por qué la intensidad del campo gravitacional aumentará en la superficie de una estrella que se encoge?
37. Si la Tierra fuese una esfera perfecta, ¿un reloj en el ecuador correría un poco más rápido o un poco más lento que un reloj idéntico en uno de los polos de la Tierra?
38. ¿Envejeces más rápido en lo alto de una montaña o en la base de la montaña?
39. Sutilezas: una persona a la que le preocupa envejecer más que a un "hombre común y corriente", ¿deberá vivir en la parte superior o en la planta baja de un edificio alto de departamentos?
40. ¿Cuál correría más lento: un reloj en el centro de un hábitat espacial giratorio o uno en la orilla? ¿O no habría diferencia?
41. Sutilezas: si alumbras con un haz de luz colorida a un amigo encima de una torre alta, ¿el color de la luz que recibe tu amigo será del mismo color de la que envías? Explica.
42. ¿La luz emitida desde la superficie de una estrella se corre al rojo o al azul por la gravedad?
43. ¿Un astronauta que cae hacia un agujero negro vería el Universo exterior correr al rojo o al azul?
44. ¿Cómo puedes "observar" un agujero negro si ni la materia ni la radiación pueden escapar de él?
45. ¿Debería ser posible en principio que un fotón diera vueltas a una estrella muy masiva?
46. ¿Por qué la atracción gravitacional entre el Sol y Mercurio varía? ¿Variaría si la órbita de Mercurio fuera perfectamente circular?
47. Tu amigo dice en un tono enigmático que, en el polo sur, un paso en cualquier dirección es un paso al norte. ¿Estás de acuerdo?
48. En el triángulo astronómico que se muestra en la Figura 36.14, con lados definidos por trayectorias de luz, la suma de los ángulos internos es mayor que 180°. ¿Existe algún triángulo astronómico cuyos ángulos interiores sumen menos que 180°?
49. ¿Las estrellas binarias (sistemas de doble estrella que orbitan en torno a un centro de masa común) radian ondas gravitacionales? ¿Por qué sí o por qué no?
50. Dadas las posibles fuentes de ondas gravitacionales en el Universo, ¿esperarías que éstas tuvieran longitudes de onda cortas o largas?
51. Con base en lo que sabes acerca de la emisión y la absorción de ondas electromagnéticas, sugiere cómo es que se emiten las ondas gravitacionales y cómo es que se absorben. (Los científicos que buscan detectar ondas gravitacionales deben hacer montajes para absorberlas.)
52. Al comparar las teorías de gravitación de Einstein y de Newton, ¿cómo puede aplicarse el principio de correspondencia?
53. Hallazgos actuales sugieren que el Universo es plano. ¿Cuál es una consecuencia de este hallazgo?
54. Elabora una pregunta de opción múltiple que demuestre que un compañero de clase comprende el principio de equivalencia.
55. Elabora una pregunta de opción múltiple que demuestre que un compañero de clase comprende el efecto de la gravedad sobre el tiempo.

## PIENSA Y DISCUTE (EVALUACIÓN)

56. A un astronauta se le proporciona "gravedad" cuando los motores de la nave espacial se activan para acelerar la nave. Esto exige el uso de combustible. ¿Hay una manera de acelerar y proporcionar "gravedad" sin el uso sostenido de combustible? Discute, tal vez con las ideas del Capítulo 8.
57. En su famosa novela *Viaje a la Luna*, Julio Verne afirmaba que los ocupantes de la nave espacial cambiarían su orientación de arriba hacia abajo cuando la nave cruzara el punto donde la gravitación de la Luna fuera mayor que la de la Tierra. ¿Esto es correcto? Discute.
58. Armado con equipo de detección muy sensible, estás al frente de un vagón de ferrocarril que acelera hacia adelante. Tu amigo en la parte posterior del vagón hace brillar luz verde hacia ti. ¿Descubres que la luz corre al rojo (baja en frecuencia), corre al azul (aumenta en frecuencia) o ninguna de las dos? Explica. (*Sugerencia*: piensa en términos del principio de equivalencia. ¿A qué es equivalente tu vagón que acelera?)
59. Prudencia y Caridad son gemelas criadas en el centro de un reino giratorio. Caridad se va a vivir a la orilla del reino durante un tiempo y luego regresa a casa. Discute cuál gemela es más vieja cuando se vuelven a ver. (Ignora cualquier efecto de dilatación de tiempo asociado al viaje hacia y desde la orilla.)
60. Desde tu marco de referencia sobre la Tierra, los objetos frenan hasta detenerse conforme se aproximan a un agujero negro en el espacio, porque el tiempo se vuelve infinitamente largo por la intensa gravedad cerca del agujero negro. Si cayeran astronautas de manera accidental en un agujero negro e intentaran enviar señales a la Tierra mediante destellos de una luz, ¿qué tipo de "telescopio" necesitarías para detectar las señales?

# PARTE OCHO Examen de práctica de opción múltiple

*Elige la MEJOR respuesta a cada una de las siguientes:*

1. Lo que Einstein descubrió acerca del espacio y el tiempo es que
   (a) son entidades separadas.
   (b) son partes de un todo.
   (c) siguen una ley de inverso al cuadrado.
   (d) son especiales para los viajeros espaciales.
2. En su teoría de la relatividad especial, Einstein afirma que las leyes de la física son
   (a) diferentes en distintas situaciones.
   (b) sentido común aplicado a cosas microscópicas y macroscópicas.
   (c) las mismas en todos los marcos de referencia.
   (d) las mismas en todos los marcos de referencia con movimiento uniforme.
3. El segundo postulado de Einstein indica que la rapidez de la luz
   (a) depende del marco de referencia.
   (b) es una constante en todos los marcos de referencia.
   (c) proporciona relojes exactos.
   (d) se enlentece en un medio transparente.
4. Cuando se habla de la dilatación del tiempo, se entiende que el tiempo
   (a) se comprime con la rapidez.
   (b) se estira con la rapidez.
   (c) es una constante a todas las rapideces.
   (d) se relaciona con el espacio.
5. Si viajas con gran rapidez, entonces, comparado con tus amigos que "permanecen en casa", eres
   (a) más viejo.
   (b) más joven.
   (c) ni más joven ni más viejo.
   (d) más alto.
6. Los relojes en una nave espacial de movimiento rápido que pasa zumbando junto a la Tierra parecen correr lento cuando se ven desde
   (a) el interior de la nave.
   (b) la Tierra.
   (c) Los dos anteriores.
   (d) Ninguno de los anteriores.
7. Si fueras a viajar con una rapidez cercana a la rapidez de la luz, podrías observar que tu propia(o)
   (a) masa cambia.
   (b) pulso disminuye.
   (c) Los dos anteriores.
   (d) Ninguno de los anteriores.
8. Conforme una fuente de luz parpadeante que se aproxima a ti gana rapidez, ves que la frecuencia de los destellos
   (a) aumenta.
   (b) disminuye.
   (c) permanece invariable.
   (d) Ninguno de los anteriores.
9. A rapideces muy altas, un objeto aparece a un observador en reposo como
   (a) más corto en la dirección de viaje.
   (b) encogido en todas direcciones.
   (c) más corto en la dirección perpendicular al viaje.
   (d) más largo en todas direcciones.
10. Comparada con la cantidad de movimiento newtoniana $p = mv$, la cantidad de movimiento de un objeto que viaja con gran rapidez es
    (a) mayor.
    (b) menor.
    (c) la misma.
    (d) depende de la masa en reposo.
11. Las ecuaciones de relatividad para el tiempo, la longitud y la cantidad de movimiento son válidas para
    (a) rapideces cotidianas bajas.
    (b) rapideces relativistas.
    (c) Los dos anteriores.
    (d) Ninguno de los anteriores.
12. Decir que $E = mc^2$ es decir que la energía
    (a) aumenta como la rapidez de la luz al cuadrado.
    (b) es el doble de la rapidez de la luz.
    (c) y la masa son equivalentes.
    (d) es igual a la masa que viaja a la rapidez de la luz al cuadrado.
13. De acuerdo con el principio de correspondencia,
    (a) una nueva teoría debe concordar con la teoría anterior donde éstas se traslapen.
    (b) la mecánica de Newton es tan válida como la mecánica de Einstein.
    (c) las ecuaciones de relatividad se aplican a grandes rapideces mientras que las ecuaciones de Newton se aplican a rapideces bajas.
    (d) la relatividad especial y la relatividad general son dos lados de la misma moneda.
14. Cosas que son equivalentes de acuerdo con el principio de equivalencia son
    (a) el espacio y el tiempo.
    (b) un gemelo viajero y un gemelo que permanece en casa.
    (c) la gravedad y la aceleración.
    (d) la masa y la energía.
15. De acuerdo con la relatividad general,
    (a) la masa distorsiona el espacio-tiempo.
    (b) la gravedad afecta los relojes.
    (c) la luz no puede escapar de un agujero negro.
    (d) Todos los anteriores.
16. De acuerdo con la geometría tetradimensional, los ángulos de un triángulo suman 180°
    (a) siempre.
    (b) a veces.
    (c) nunca.
    (d) sólo en el planeta Tierra.
17. La relatividad general predice que
    (a) la luz que sale del Sol se enlentece por la gravedad.
    (b) la luz que pasa junto al Sol se desvía.
    (c) un reloj en la superficie del Sol corre más rápido que en la Tierra.
    (d) Todos los anteriores.
18. Si una estrella que está a 20 años-luz de la Tierra explota, las ondas gravitacionales provenientes de la explosión llegarían a la Tierra en
    (a) menos de 20 años.
    (b) 20 años.
    (c) más de 20 años.
    (d) Ninguno de los anteriores.

*Después* de hacer elecciones razonadas y discutirlas con tus amigos, encuentra las respuestas en la página S-1.

# Epílogo

Espero que hayas disfrutado *Física conceptual* y valores tu conocimiento de la física como un componente importante de tu educación general —un estudio de las reglas de la naturaleza que puede enriquecer tu manera de ver el mundo—. Cuán fascinante es que tantas cosas en la naturaleza estén interconectadas y que haya fenómenos que parecen diversos y sigan las mismas reglas básicas: una manzana que cae sigue las mismas reglas que una estación espacial en órbita terrestre, lo rojizo del cielo al atardecer se relaciona con su azulado a mediodía y la electricidad y el magnetismo se unen para formar luz. Las conexiones entre las cosas son la base de la ciencia. Pero el valor de la ciencia rebasa estas conexiones: es una manera de pensar. Conforme aumenta el conocimiento, también aumenta el pensamiento. Y con el pensamiento, también aumenta tu capacidad para dar forma a este mundo que habitas y lograr una vida mejor para todos.

Cuando era niño, se pensaba que la Tierra era excepcional en el Universo, el único lugar con vida inteligente, con la certeza de que los seres humanos eran especiales; y, más aun, incluso sagrados. Más tarde recuerdo mi impresión cuando me enteré que existen más estrellas en el Universo que granos de arena en las playas de la Tierra. ¡Hoy se llega a la conclusión de que existen más planetas que estrellas ahí afuera! La suposición de que sólo este rincón del Universo tiene vida inteligente es puesta en duda como nunca antes. Y si los seres humanos se comunicaran con seres avanzados "allá afuera", ¿qué podrían aprender?

¿Descubriría el ser humano que su ciencia está equivocada, que no ha avanzado lo suficiente? Los científicos en realidad recibirían con gusto esa noticia porque siempre dan por sentado que el conocimiento actual es tentativo, sujeto no sólo a revisión sino también a sustitución. ¿Descubrirían que las religiones, todas ellas, están equivocadas, son demasiado rústicas y sólo son los primeros pasos hacia una apreciación más plena de la naturaleza y del lugar de la humanidad en el Universo?

Cuando el influyente físico Richard Feynman decía que no sabía nada, se refería a que, comparado con lo que todavía está por conocerse, su conocimiento (y el del resto de las personas) era escaso. ¿Acaso el ser humano tiene que esperar mensajes del espacio exterior para sentirse estimulado a tener una visión más completa de la naturaleza y de su lugar en ella? Para algunos, tristemente así es. Pero no para un número cada vez mayor de personas imaginativas que adoptan una actitud escéptica hacia todo conocimiento. En la actualidad, más personas destinan sus energías intelectuales y emocionales a la solución de los problemas locales y globales. Cada vez más y más personas cobran conciencia de que la Tierra es su casa, aun cuando sea sólo una de muchas casas en este magnífico Universo. Los esfuerzos de las personas que dan lo mejor de sí están brindando a la Tierra los cuidados que necesita y están elevando las condiciones de vida del ser humano. Estoy optimista de que la razón prevalecerá.

Me quito el sombrero ante las formas racionales de pensar.

APÉNDICE A

# Sobre la medición y la conversión de unidades

Dos sistemas principales de medición destacan en el mundo de hoy: el *sistema de unidades comunes de Estados Unidos* (USCS, por sus siglas en inglés, antes llamado sistema británico de unidades), que se utiliza en Estados Unidos y anteriormente en Myanmar, y el *Système International* (SI) (conocido también como sistema internacional y como sistema métrico), que se utiliza en el resto del mundo. Cada sistema tiene sus propios estándares de longitud, masa y tiempo. Las unidades de longitud, masa y tiempo se denominan a veces *unidades fundamentales* porque, una vez que se seleccionan, otras cantidades pueden expresarse en sus términos.

## Sistema de unidades comunes de Estados Unidos

Con base en el sistema imperial británico, el USCS es familiar para todos los que viven en Estados Unidos. Usa el pie como la unidad de longitud, la libra como la unidad de peso o fuerza y el segundo como la unidad de tiempo. En la actualidad, el USCS se está sustituyendo con el sistema internacional, rápido en la ciencia y la tecnología, así como en algunos deportes (pista y natación), pero con mucha lentitud en otras áreas y en algunas especialidades en las que el cambio parece no llegar nunca. Por ejemplo, se seguirán comprando asientos en la línea de la yarda 50. Recuerda las películas fotográficas en milímetros y los discos compactos en pulgadas.

Para medir el tiempo, no hay diferencia entre los dos sistemas, excepto que en el SI puro la única unidad es el segundo (s, no seg) con prefijos; sin embargo, en general, el minuto, la hora (h, no hr), el día, el año, etc., son aceptados en el USCS.

## Système International

Durante la Conferencia Internacional de Pesos y Medidas de 1960, realizada en París, las unidades del SI se definieron y recibieron un estatus. En la Tabla A.1 se indican las unidades SI y sus símbolos. El SI se basa en el *sistema métrico*, que fue creado por científicos franceses después de la Revolución Francesa y se oficializó en 1799. Gracias a que es un sistema ordenado, es útil para el trabajo científico, y lo usan científicos de todo el mundo. El sistema métrico se divide en dos sistemas de unidades. En uno de ellos la unidad de longitud es el metro, la unidad de masa es el kilogramo y la unidad de tiempo es el segundo. A éste se le llama sistema *metro-kilogramo-segundo* (mks) y es el preferido en física. El otro es el sistema *centímetro-gramo-segundo* (cgs) que, debido a sus valores más pequeños, es el favorito en la química. Las unidades cgs y mks se relacionan

**TABLA A.1 UNIDADES SI**

| Cantidad | Unidad | Símbolo |
|---|---|---|
| Longitud | metro | m |
| Masa | kilogramo | kg |
| Tiempo | segundo | s |
| Fuerza | newton | N |
| Energía | joule | J |
| Corriente | ampere | A |
| Temperatura | kelvin | K |

**TABLA A.2 CONVERSIONES ENTRE DIFERENTES UNIDADES DE LONGITUD**

| Unidad de longitud | Kilómetro | Metro | Centímetro | Pulgada | Pie | Milla |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 kilómetro | = 1 | 1,000 | 100,000 | 39,370 | 3,280.84 | 0.62140 |
| 1 metro | = 0.00100 | 1 | 100 | 39.370 | 3.28084 | $6.2110^{4}$ |
| 1 centímetro | = $1.010^{5}$ | 0.0100 | 1 | 0.3937 | 0.032808 | $6.2110^{6}$ |
| 1 pulgada | = $2.5410^{5}$ | 0.0254 | 2.54 | 1 | 0.08333 | $1.5810^{5}$ |
| 1 pie | = $3.0510^{4}$ | 0.3048 | 30.48 | 12 | 1 | $1.8910^{4}$ |
| 1 milla | = 1.60934 | 1,609.34 | 160,934 | 63,360 | 5,280 | 1 |

entre sí del modo siguiente: 100 centímetros igual 1 metro; 1,000 gramos son igual a 1 kilogramo. La Tabla A.2 menciona varias unidades de longitud relacionadas entre sí.

La ventaja principal de un sistema métrico es que utiliza el sistema decimal, en el cual todas las unidades pueden convertirse a unidades más pequeñas o más grandes al dividir o multiplicar por 10. Los prefijos dados en la Tabla A.3 suelen utilizarse para mostrar las relaciones entre unidades.

**TABLA A.3 ALGUNOS PREFIJOS**

| Prefijo | Definición |
|---|---|
| nano- | 1 mil millonésima: 1 nanosegundo es 1 mil millonésima de segundo |
| micro- | 1 millonésima: 1 microsegundo es 1 millonésima de segundo |
| mili- | 1 milésima: 1 miligramo es 1 milésima de gramo |
| centi- | 1 centésima: 1 centímetro es 1 centésimo de metro |
| kilo- | 1 mil: 1 kilogramo es 1,000 gramos |
| mega- | 1 millón: 1 megahertz es 1 millón de hertz |
| giga- | 1 mil millones: 1 gigahertz son mil millones de hertz |

## Metro

El estándar de longitud del sistema métrico originalmente se definió en términos de la distancia del polo norte al ecuador. En esa época, se estableció que esta distancia era igual a 10,000 kilómetros. Una diezmillonésima de esto, el metro, se determinó con sumo cuidado y se marcó mediante rayas sobre una barra de aleación de platino-iridio. Esta barra se conserva en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas en Francia. Después, el metro estándar en Francia se calibró en términos de la longitud de onda

de la luz: en 1960, como 1,650,763.73 veces la longitud de onda de la luz anaranjada emitida por los átomos del gas criptón-86. En 1983 se definió como la longitud de la trayectoria recorrida por la luz en un vacío durante un intervalo de 1/299,792,458 de segundo.

## Kilogramo

La unidad estándar de masa, el kilogramo, es un bloque de aleación platino-iridio, también conservado en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas en Francia (Figura A.1). El kilogramo es igual a 1,000 gramos. Un gramo es la masa de 1 centímetro cúbico (cc) de agua a una temperatura de 4°C. (La libra estándar se define en términos del kilogramo estándar; la masa de un objeto que pesa 1 libra es igual a 0.4536 kilogramo.)

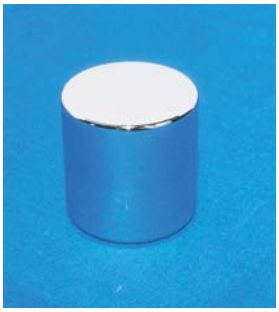


**FIGURA A.1**
El kilogramo estándar.

## Segundo

La unidad oficial de tiempo tanto en el USCS como en el SI es el segundo. Hasta 1956 se definió en términos del día solar medio, el cual se dividió en 24 horas. Cada hora se dividió en 60 minutos y cada minuto en 60 segundos. Por tanto, había 86,400 segundos por día, y el segundo se definió como 1/86,400 del día solar medio. Esto resultó insatisfactorio porque la tasa de rotación de la Tierra es gradualmente más lenta. En 1956 se eligió el día solar medio de 1900 como el estándar sobre el cual basar el segundo. En 1964, el segundo se definió oficialmente como el tiempo que tarda un átomo de cesio-133 en realizar 9,192,631,770 vibraciones.

## Newton

Un newton es la fuerza necesaria para acelerar 1 kilogramo a 1 metro por segundo por segundo. Esta unidad se llama así en honor a sir Isaac Newton.

## Joule

Un joule es igual a la cantidad de trabajo realizado por una fuerza de 1 newton que actúa sobre una distancia de 1 metro. En 1948, la Conferencia Internacional de Pesos y Medidas adoptó el joule como la unidad de energía. Por tanto, el calor específico del agua a 15°C ahora se indica como 4,185.5 joules por kilogramo por grado Celsius. Esta cifra siempre está asociada al equivalente mecánico del calor: 4.1855 joules por caloría.

## Ampere

El ampere se define como la intensidad de corriente eléctrica constante que, cuando se mantiene en dos conductores paralelos de longitud infinita, sección transversal despreciable, y separados 1 metro en el vacío, producirían entre ellos una fuerza igual a $2 \times 10^{-7}$ newton por metro de longitud. Cuando se abordó la corriente eléctrica en este texto, se utilizó la definición del ampere no tan oficial, pero más fácil de comprender,

que indica que es la tasa de flujo de 1 coulomb de carga por segundo, donde 1 coulomb es la carga de $6.2510^{18}$ electrones.

## Kelvin

La unidad fundamental de temperatura recibe su nombre del científico William Thompson, lord Kelvin. El kelvin se define como 1/273.15 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua (el punto fijo al cual el hielo, el agua líquida y el vapor de agua coexisten en equilibrio). Esta definición se adoptó en 1968 cuando se decidió cambiar el nombre de *grado Kelvin* (°K) a *kelvin* (K). La temperatura de fusión del hielo a presión atmosférica es 273.15 K. La temperatura a la cual la presión de vapor del agua pura es igual a la presión atmosférica estándar es 373.15 K (la temperatura del agua en ebullición a presión atmosférica estándar).

## Área

La unidad de área es un cuadrado que tiene una unidad estándar de longitud como lado. En el USCS, es un cuadrado con lados que tienen 1 pie de longitud, llamado 1 pie cuadrado y escrito 1 $ft^2$. En el sistema internacional, es un cuadrado con lados que miden 1 metro de largo, lo que constituye un área de 1 $m^2$. En el sistema cgs es 1 $cm^2$. El área de una superficie dada se especifica por el número de pies cuadrados, metros cuadrados o centímetros cuadrados que cabrían en ella. El área de un rectángulo es igual a la base por la altura. El área de un círculo es igual a $\pi r^2$, donde $\pi$ es la razón entre la circunferencia de un círculo y su diámetro, aproximadamente 3.14. Las fórmulas para las áreas de otros objetos pueden encontrarse en libros de geometría o en Internet.

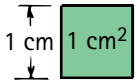



**FIGURA A.2**
Cuadrado unidad o cuadrado unitario.

## Volumen

El volumen de un objeto se refiere al espacio que ocupa. La unidad de volumen es el espacio ocupado por un cubo que tiene una unidad estándar de longitud en su borde. En la USCS, una unidad de volumen es el espacio ocupado por un cubo de 1 pie por borde y se llama 1 pie cúbico; se escribe 1 $ft^3$. En el sistema métrico, es el espacio ocupado por un cubo con lados de 1 metro (SI) o 1 centímetro (cgs). Se escribe 1 $m^3$ o 1 $cm^3$ (o cc). El volumen de un espacio determinado se especifica por el número de pies cúbicos, metros cúbicos o centímetros cúbicos que cabrían en él.

En el USCS, los volúmenes pueden medirse en cuartos, galones y pulgadas cúbicas, así como en pies cúbicos. En 1 $ft^3$. hay 1,728 ($12 \times 12 \times 12$) pulgadas cúbicas. Un galón estadounidense es un volumen de 231 $in^3$. Cuatro cuartos es igual a 1 galón. En el SI, los volúmenes también se miden en litros. Un litro es igual a 1,000 $cm^3$. Un litro equivale aproximadamente a 1.06 cuartos.

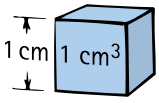



**FIGURA A.3**
Volumen unidad o volumen unitario.

# Conversión de unidades

Con frecuencia, en la ciencia, y especialmente en el ámbito del laboratorio, es necesario convertir de una unidad a otra. Para hacerlo, sólo necesitas multiplicar la cantidad dada por el *factor de conversión* apropiado.

Todos los factores de conversión pueden escribirse como razones en las que numerador y denominador representan la cantidad equivalente expresada en unidades diferentes. Debido a que cualquier cantidad dividida entre sí misma es igual a 1, todos los factores de conversión son físicamente iguales a 1. Por ejemplo, los siguientes dos factores de conversión se derivan ambos de la relación 100 centímetros = 1 metro:

$$\frac{100 \text{ centímetros}}{1 \text{ metro}} = 1 \quad \frac{1 \text{ metro}}{100 \text{ centímetros}} = 1$$

Puesto que todos los factores de conversión son físicamente iguales a 1, multiplicar una cantidad por un factor de conversión no cambia el valor de la cantidad. Lo que cambia son las unidades y la cantidad de dichas unidades. Supón que mides un objeto que tiene 60 centímetros de longitud. Para convertir esta medición a metros, la multiplicas por el factor de conversión que te permita cancelar los centímetros.

**PUNTO DE CONTROL**

Convierte 60 centímetros a metros.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

$$(60 \cancel{\text{centímetros}}) \frac{(1 \text{ metro})}{(100 \cancel{\text{centímetros}})} = 0.6 \text{ metros}$$

| ↑ | ↑ | ↑ |
|---|---|---|
| cantidad en centímetros | factor de conversión | cantidad en metros |

Para derivar un factor de conversión, consulta una tabla que presente igualdades entre unidades, como la Tabla A.2, o la que se encuentra en el forro de este libro. Luego multiplica la cantidad dada por el factor de conversión y, *¡voilá!*: las unidades se convierten. Siempre ten cuidado de apuntar tus unidades. Son tu guía final, que te dicen qué números van en cada lugar y si estás escribiendo adecuadamente la ecuación.

APÉNDICE B

# Más sobre el movimiento

Cuando se describe el movimiento de algo, se indica cómo se mueve con respecto a algo más (Capítulo 3). En otras palabras, el movimiento exige un marco de referencia (un observador, origen y ejes). Tienes la libertad de elegir la ubicación de este marco y de moverlo con respecto a otro marco. Cuando tu marco en movimiento tiene una aceleración cero, éste se llama un *marco inercial*. En un marco inercial, la fuerza hace que un objeto acelere en concordancia con las leyes de Newton. Cuando el marco de referencia es acelerado, se observan fuerzas y movimientos ficticios (Capítulo 8). Las observaciones desde un tiovivo, por ejemplo, son diferentes cuando gira que cuando está en reposo. Las descripciones del movimiento y la fuerza dependen de tu "punto de vista".

Se distingue entre la *rapidez* y la *velocidad* (Capítulo 3). La rapidez es qué tanto se mueve algo, o la tasa de cambio de la posición en el tiempo (excluida la dirección): una cantidad *escalar*. La velocidad incluye la dirección del movimiento: una cantidad *vectorial* cuya magnitud es la rapidez. Los objetos que se mueven con una velocidad constante se mueven la misma distancia en el mismo tiempo y en la misma dirección.

Otra diferencia entre rapidez y velocidad tiene que ver con la diferencia entre distancia y cambio de posición, o *desplazamiento*. La rapidez es la *distancia por duración*, en tanto que la velocidad es el *desplazamiento por duración*. El desplazamiento difiere de la distancia. Por ejemplo, una persona que viaja 10 kilómetros de ida al trabajo y también de regreso, recorre 20 kilómetros pero no "va" a ninguna parte. La distancia recorrida es de 20 kilómetros y el desplazamiento es cero. Aunque la rapidez instantánea y la velocidad instantánea tienen el mismo valor en el mismo instante, la rapidez promedio y la velocidad promedio pueden ser muy diferentes. La rapidez promedio del viaje redondo de esta persona es de 20 kilómetros dividida entre el tiempo del viaje total: un valor mayor que cero. Pero la velocidad promedio es cero. En ciencia, muy a menudo es más importante el desplazamiento que la distancia. (Para no sobrecargarte de información, no se abordó esta diferencia en el texto.)

La aceleración es la tasa a la que cambia la velocidad. Puede ser un cambio sólo de rapidez, un cambio sólo de dirección o ambos. Al frenado con frecuencia se le denomina *desaceleración*.

En el espacio y el tiempo newtonianos, el espacio tiene tres dimensiones (longitud, ancho y altura), cada una con dos direcciones. Puedes ir, detenerte y regresar en cualquiera de ellos. El tiempo tiene una dimensión, con dos direcciones: pasado y futuro. No puedes detenerte y regresar, sólo ir. En el espacio-tiempo einsteiniano se combinan estas cuatro dimensiones (Capítulo 35).

## Cómo calcular la velocidad y la distancia recorrida sobre un plano inclinado

Recuerda, del Capítulo 2, los experimentos de Galileo con planos inclinados. Piensa en un plano inclinado de tal modo que la rapidez de una bola que rueda aumenta a la tasa de 2 metros por segundo a cada segundo: una aceleración de 2 m/s$^2$. En el instante cuando comienza a moverse, la velocidad de la bola es cero; 1 segundo después, rueda a 2 m/s; al final del siguiente segundo, 4 m/s; al final del siguiente segundo,

6 m/s, y así sucesivamente. Si la bola parte del reposo, su velocidad en cualquier instante es simplemente:

$$\text{velocidad} = \text{aceleración} \times \text{tiempo}$$

o, en notación abreviada,

$$v = at$$

(Suele omitirse el signo de multiplicación, ×, cuando se expresan relaciones en forma matemática. Cuando dos símbolos se escriben juntos, como el *at* en este caso, se entiende que se multiplican.)

Qué tan rápido rueda la bola es una cosa; qué tan *lejos* rueda es otra. Para entender la relación entre la aceleración y la distancia recorrida, primero debes investigar la relación entre la velocidad instantánea y la *velocidad promedio*. Si la bola que se muestra en la Figura B.1 parte del reposo, rodará una distancia de 1 metro en el primer segundo. Pregunta: ¿cuál será su rapidez promedio? La respuesta es 1 m/s (porque cubre 1 metro en el intervalo de 1 segundo). Pero ya viste que la *velocidad instantánea* al final del primer segundo es 2 m/s. Dado que la aceleración es uniforme, el promedio en cualquier intervalo de tiempo se encuentra de la misma forma que suele encontrarse el promedio de cualesquiera dos números: se suman y se dividen entre 2. (¡Ten cuidado de no hacer esto cuando la aceleración no sea uniforme!) De este modo, si sumas la rapidez inicial (cero en este caso) y la rapidez final de 2 m/s y luego divides entre 2, obtienes 1 m/s para la velocidad promedio.

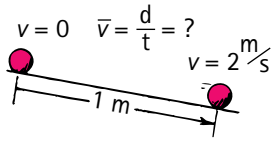



**FIGURA B.1**
La bola rueda 1 m por el plano inclinado en 1 s y alcanza una rapidez de 2 m/s. Sin embargo, su rapidez promedio es 1 m/s. ¿Ves por qué?

En cada segundo sucesivo se ve que la bola rueda una mayor distancia por la misma pendiente en la Figura B.2. Observa que la distancia recorrida en el segundo intervalo de tiempo es de 3 metros. Esto es así porque la rapidez promedio de la bola en este intervalo es 3 m/s. En el siguiente intervalo de 1 segundo, la rapidez promedio es 5 m/s, de modo que la distancia recorrida es 5 metros. Es interesante ver que los incrementos sucesivos de distancia aumentan en una *secuencia de números nones*. ¡No hay duda de que la naturaleza sigue reglas matemáticas!

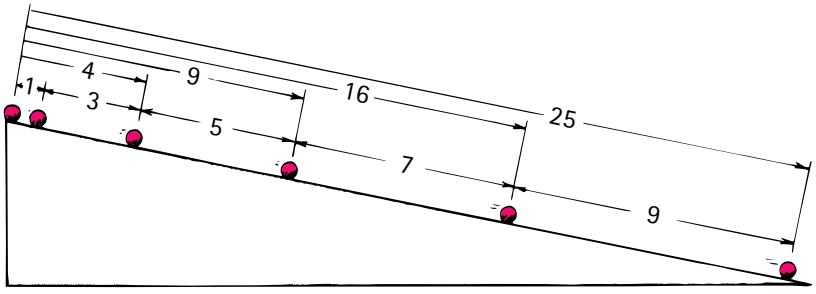



**FIGURA B.2**
Si la bola recorre 1 m durante su primer segundo, entonces, en cada segundo sucesivo, recorrerá la secuencia de números nones 3, 5, 7, 9 m, y así sucesivamente. Observa que la distancia total recorrida aumenta como el cuadrado del tiempo total.

**PUNTO DE CONTROL**
Durante el lapso del segundo intervalo de tiempo, la bola comienza a 2 m/s y termina a 4 m/s. ¿Cuál es la *rapidez promedio* de la bola durante este intervalo de 1 s? ¿Cuál es su *aceleración*?

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

$$\text{Rapidez promedio} = \frac{\text{rapidez inicial} + \text{rapidez final}}{2}$$

$$= \frac{2\ \text{m/s} + 4\ \text{m/s}}{2} = 3\ \text{m/s}$$

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio en velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

$$= \frac{4\ \text{m/s} - 2\ \text{m/s}}{1\ \text{s}} = \frac{2\ \text{m/s}}{1\ \text{s}} = 2\ \text{m/s}^2$$

Examina con cuidado la Figura B.2 y observa la distancia *total* recorrida a medida que la bola acelera por el plano. Las distancias van desde cero hasta 1 metro en 1 segundo, cero a 4 metros en 2 segundos, cero a 9 metros en 3 segundos, cero a 16 metros en 4 segundos, y así en los segundos sucesivos. La secuencia de *distancias totales* recorridas es de los *cuadrados del tiempo*. Se examinará más de cerca la relación entre distancia recorrida y el cuadrado del tiempo para aceleración constante en el caso de caída libre.

## Cómo calcular la distancia cuando la aceleración es constante

¿Cuánto caerá un objeto que se suelta desde el reposo en un tiempo dado? Para responder esta pregunta, considera el caso en el cual el objeto cae libremente durante 3 segundos, a partir del reposo. Si ignoras la resistencia del aire, el objeto tendrá una aceleración constante de más o menos 10 metros por segundo cada segundo (en realidad, alrededor de 9.8 m/s$^2$, pero se quiere que los números sean fáciles de seguir).

$$\text{Velocidad al } \textit{comienzo} = 0 \text{ m/s}$$

$$\text{Velocidad al } \textit{final} \text{ de 3 segundos} = (10 \times 3) \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned}\text{Velocidad } \textit{promedio} &= \tfrac{1}{2} \text{ la suma de esas dos rapideces} \\ &= \tfrac{1}{2} \times (0 + 10 \times 3) \text{ m/s} \\ &= \tfrac{1}{2} \times 10 \times 3 = 15 \text{ m/s}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Distancia recorrida} &= \text{velocidad promedio} \times \text{tiempo} \\ &= (\tfrac{1}{2} \times 10 \times 3) \times 3 \\ &= \tfrac{1}{2} \times 10 \times 3^2 = 45 \text{ m}\end{aligned}$$

Puedes ver, a partir de los significados de estos números, que:

$$\text{Distancia recorrida} = \tfrac{1}{2} \times \text{aceleración} \times \text{tiempo al cuadrado}$$

Esta ecuación es válida para un objeto que cae no sólo durante 3 segundos, sino cualquier duración de tiempo, en tanto la aceleración sea constante. Si $d$ representa la distancia recorrida, $a$ la aceleración y $t$ el tiempo, la regla puede escribirse, en notación abreviada, como:

$$d = \tfrac{1}{2} at^2$$

Esta relación la dedujo por primera vez Galileo. Él razonó que, si un objeto cae durante, por decir, el doble de tiempo, caerá con *el doble de rapidez promedio*. Puesto que cae durante el *doble* de tiempo al *doble* de rapidez promedio, caerá *cuatro* veces más lejos. De igual modo, si un objeto cae durante *tres* veces el tiempo, éste tendrá una rapidez promedio *tres* veces más grande y caerá *nueve* veces más lejos. Galileo razonó que la distancia total de caída debe ser proporcional al *cuadrado* del tiempo.

En el caso de objetos en caída libre, suele usarse la letra $g$ para representar la aceleración en lugar de la letra $a$ ($g$ porque la aceleración se debe a la *gravedad*). Aunque el valor de $g$ varía un poco en diferentes partes del mundo, es aproximadamente igual a 9.8 m/s$^2$ (32 ft/s$^2$). Si usas $g$ para la aceleración de un objeto en caída libre (resistencia del aire despreciable), las ecuaciones para los objetos que caen a partir de una posición de reposo se convierten en:

$$v = gt$$

$$d = \tfrac{1}{2} gt^2$$

Mucha de la dificultad para aprender física, lo mismo que cualquier disciplina, tiene que ver con aprender el lenguaje: los muchos términos y definiciones. La rapidez es un poco diferente de la velocidad, y la aceleración es muy diferente de la rapidez o de la velocidad.

**PUNTO DE CONTROL**

1. Un automóvil que parte del reposo tiene una aceleración constante de 4 m/s$^2$. ¿Cuánto recorrerá en 5 s?
2. ¿Cuánto caerá un objeto soltado desde el reposo en 1 s? En este caso la aceleración es $g = 9.8$ m/s$^2$.
3. Si un objeto tarda 4 s en caer libremente al agua cuando se suelta desde el puente Golden Gate, ¿qué tan alto está el puente?

**COMPRUEBA TUS RESPUESTAS**

**1.** Distancia = $\frac{1}{2} \times 4 \times 5^2 = 50$ m

**2.** Distancia = $\frac{1}{2} \times 9.8 \times 1^2 = 4.9$ m

**3.** Distancia = $\frac{1}{2} \times 9.8 \times 4^2 = 78.4$ m

Observa que las unidades de medición cuando se multiplican producen las unidades adecuadas de metros para distancia:

$$d = \tfrac{1}{2} \times 9.8 \text{ m}/\cancel{\text{s}}^2 \times 16 \cancel{\text{s}}^2 = 78.4 \text{ m}$$

La masa y el peso se relacionan, pero son diferentes entre sí. Lo mismo sucede con el trabajo, el calor y la temperatura. Por favor, sé paciente contigo mismo, ya que aprender las semejanzas y diferencias entre los conceptos físicos no es tarea sencilla.

Hasta el momento las ecuaciones para rapidez y distancia han sido para casos que parten del reposo. ¿Y qué hay de los objetos que experimentan una aceleración uniforme y no parten del reposo? Un poco de razonamiento te mostrará que:

$$v = v_0 + at$$
$$d = v_0 t + \tfrac{1}{2} at^2$$

Simplemente se agregaron las condiciones iniciales: la velocidad que comienza con $v_0$ y la distancia recorrida aumentada por $v_0 t$. El sentido común te dirá que, cuando la aceleración es cero, estas ecuaciones se convierten en:

$$v = v_0$$
$$d = v_0 t$$

APÉNDICE C

# Elaboración de gráficas

## Gráficas: una forma de expresar relaciones cuantitativas

Las gráficas, al igual que las ecuaciones y las tablas, muestran cómo se relacionan dos o más cantidades entre sí. Dado que investigar las relaciones entre cantidades constituye mucho del trabajo de la física, las ecuaciones, las tablas y las gráficas son herramientas importantes para la física.

Las ecuaciones son la forma más concisa de describir relaciones cuantitativas. Por ejemplo, considera la ecuación $v = v_0 + gt$. Describe de manera compacta cómo la velocidad de un objeto en caída libre depende de su velocidad inicial, la aceleración debida a la gravedad y el tiempo. Las ecuaciones son expresiones abreviadas de relaciones entre cantidades.

Las tablas proporcionan valores de variables en forma de lista. La dependencia de $v$ sobre $t$ en $v = v_0 + gt$ puede mostrarse con una tabla que mencione varios valores de $v$ para correspondientes tiempos $t$. La Tabla 3.2 de la página 46 es un ejemplo. Las tablas son especialmente útiles cuando la relación matemática entre las cantidades se desconoce, o cuando tienen que proporcionarse valores numéricos con un alto grado de exactitud. Además, las tablas permiten registrar datos experimentales.

Las gráficas son una representación *visual* de las relaciones entre las cantidades. Cuando se observa la forma de una gráfica, se puede decir con rapidez mucho acerca de cómo se relacionan las variables. Por esta razón, las gráficas ayudan a aclarar el significado de una ecuación o una tabla de números. Y, cuando la ecuación todavía no se conoce, una gráfica puede ayudar a revelar la relación entre las variables. A menudo los datos experimentales se grafican por esta razón.

Las gráficas son útiles en otra forma. Si una gráfica contiene suficientes puntos, puede servir para estimar valores entre los puntos (interpolación) o valores después de los puntos (extrapolación).

## Gráficas cartesianas

La gráfica más común y útil en ciencia es la gráfica *cartesiana*. En una gráfica cartesiana, los posibles valores de una variable se representan sobre el eje vertical (llamado *eje y*) y los posibles valores de la otra variable se grafican sobre el eje horizontal (*eje x*).

La Figura C.1 muestra una gráfica de dos variables, $x$ y $y$, que son *directamente proporcionales* una a la otra. Una proporcionalidad directa es un tipo de relación *lineal*. Las relaciones lineales tienen gráficas en línea recta, el tipo de gráficas más sencillo de interpretar. En la gráfica que se muestra en la Figura C.1, la línea recta continua que se eleva de izquierda a derecha te dice que, conforme $x$ aumenta, $y$ aumenta. De manera más específica, muestra que $y$ aumenta a una tasa constante con respecto a $x$. Conforme $x$ aumenta, $y$ aumenta. La gráfica de una proporcionalidad directa con frecuencia pasa a través del "origen", el punto en la esquina inferior izquierda donde $x = 0$ y $y = 0$. Sin embargo, en la Figura C.1 se ve que la gráfica comienza donde $y$ tiene un valor distinto de cero cuando $x = 0$. El valor de $y$ tiene una "ventaja".

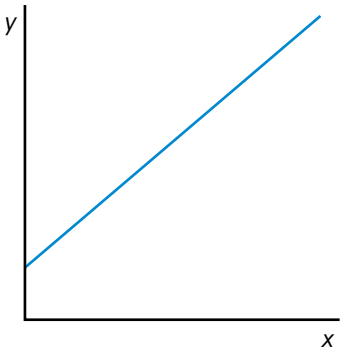



FIGURA C.1

La Figura C.2 muestra una gráfica de la ecuación $v = v_0 + gt$. La rapidez $v$ se grafica a lo largo del eje $y$, y el tiempo $t$ a lo largo del eje $x$. Como puedes ver, hay una relación lineal entre $v$ y $t$. Observa que la rapidez inicial es 10 m/s. Si la rapidez inicial fuese 0, como cuando sueltas un objeto desde el reposo, entonces la gráfica intersecaría el origen, donde tanto $v$ como $t$ son 0. Observa que la gráfica se origina en $v = 10$ m/s cuando $t = 0$, lo que muestra una "ventaja" de 10 m/s.

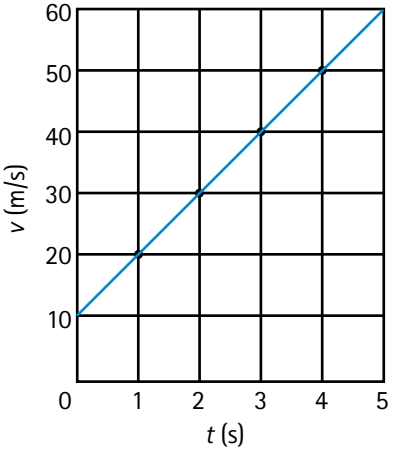



FIGURA C.2

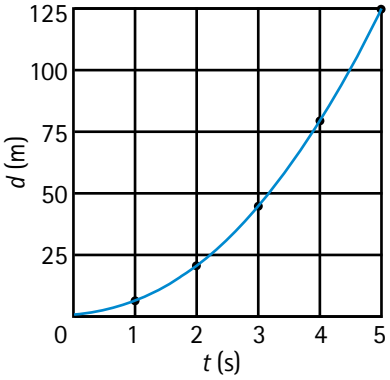



FIGURA C.3

Sin embargo, muchas relaciones significativas en términos físicos son más complicadas que las relaciones lineales. Si duplicas el tamaño de una habitación, el área del suelo aumenta cuatro veces; triplicar el tamaño de la habitación incrementa el área del suelo nueve veces, y así sucesivamente. Éste es un ejemplo de una relación *no lineal*. La Figura C.3 muestra una gráfica de otra relación no lineal: distancia frente a tiempo en la ecuación de caída libre desde el reposo, $d = \frac{1}{2}gt^2$.

La Figura C.4 muestra una *curva de radiación*. La *curva* (o gráfica) muestra la relación no lineal más bien compleja entre la intensidad $I$ y la longitud de onda $\lambda$ de la radiación para un objeto que brilla a 2,000 K. La gráfica muestra que la radiación es más intensa cuando $\lambda$ es igual a aproximadamente 1.4 $\mu$m. ¿Cuál es más brillante: la radiación a 0.5 $\mu$m o la radiación a 4.0 $\mu$m? La gráfica rápido te dice que la radiación a 4.0 $\mu$m es mucho más intensa.

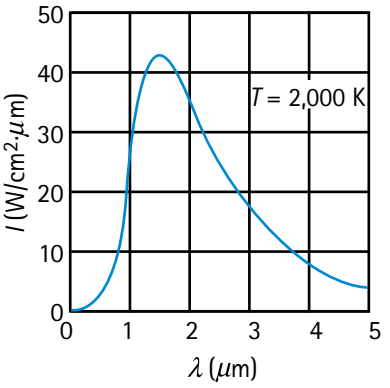



FIGURA C.4

## Pendiente y área bajo la curva

A partir de la pendiente y el área bajo la curva de una gráfica puede obtenerse información cuantitativa. La pendiente de la gráfica en la Figura C.2 representa la tasa a la que $v$ aumenta con relación a $t$. Para calcularla se divide un segmento $\Delta v$ a lo largo del eje $y$ entre un segmento correspondiente $\Delta t$ a lo largo del eje $x$. Por ejemplo, al dividir $\Delta v$ de 30 m/s entre $\Delta t$ de 3 s produce $\Delta v/\Delta t = 10$ m/s·s $= 10$ m/s$^2$,

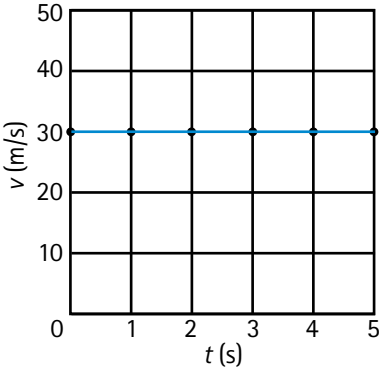



FIGURA C.5

la aceleración debida a la gravedad. Por el contrario, considera la gráfica de la Figura C.5, que es una línea recta horizontal. Su pendiente de cero muestra una aceleración cero; esto es: rapidez constante. La gráfica muestra que la rapidez es 30 m/s a lo largo de todo el intervalo de 5 segundos. La tasa de cambio, o pendiente, de la rapidez con respecto al tiempo es cero: no hay cambio en la rapidez en absoluto.

El área bajo la curva es una característica importante de una gráfica porque a menudo tiene una interpretación física. Por ejemplo, considera el área bajo la gráfica de $v$ contra $t$ que se muestra en la Figura C.6. La región sombreada es un rectángulo con lados de 30 m/s y 5 s. Su área es 30 m/s $\times$ 5 s $=$ 150 m. En este ejemplo, el área es la distancia cubierta por un objeto que se mueve con una rapidez constante de 30 m/s durante 5 s ($d = vt$).

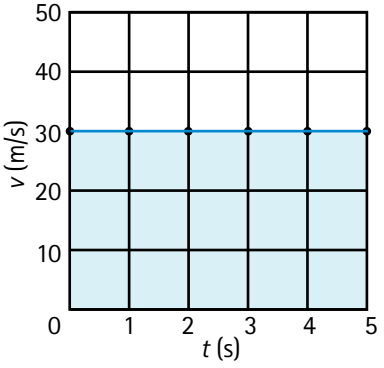



FIGURA C.6

El área no necesita ser rectangular. El área bajo cualquier curva de $v$ frente a $t$ representa el cambio de posición en un intervalo de tiempo determinado. De igual modo, el área bajo una curva de aceleración contra tiempo proporciona el cambio de velocidad en un intervalo de tiempo. El área bajo una curva de fuerza contra tiempo proporciona el cambio de cantidad de movimiento. (¿Qué proporciona el área bajo una curva de fuerza contra distancia?) El área no rectangular bajo varias curvas que representan funciones, incluidas algunas más bien complicadas, puede encontrarse gracias a una importante rama de las matemáticas: el *cálculo integral*.

# Elaboración de gráficas con *Física conceptual*

Puedes desarrollar habilidades básicas para crear gráficas en la sección de laboratorio de este curso. Los laboratorios "Sonic Ranger" y "Go! Go! Go!" te introducen a los conceptos de gráficas del movimiento. "Motivating the Moving Man" usa una simulación por computadora que genera gráficas de movimiento. Tanto "Force Mirror" como "Sonic Ranger" tienen que ver con gráficas generadas por sensores con sensores de fuerza en lugar de sensores de movimiento. "Totally Stressed Out" requiere la elaboración manual de gráficas de datos de la ley de Hooke. El laboratorio "The Weight" pone énfasis en la interpretación de la pendiente de una gráfica. En "Water Waves in an Electric Sink" y "High Quiet Low Loud" verás cómo pueden usarse las gráficas para representar ondas y sonidos.

En la sección de laboratorio de tu curso de *Física conceptual* también aprenderás que las computadoras pueden graficar datos por ti. No eres ningún holgazán cuando graficas tus datos con un programa de software. En vez de invertir tiempo y energía en escalar los ejes y colocar los puntos, aprovechas tu tiempo y energía para investigar el significado de la gráfica, ¡un nivel superior de pensamiento!

## PUNTO DE CONTROL

La Figura C.7 es una representación gráfica de una bola soltada en una mina.

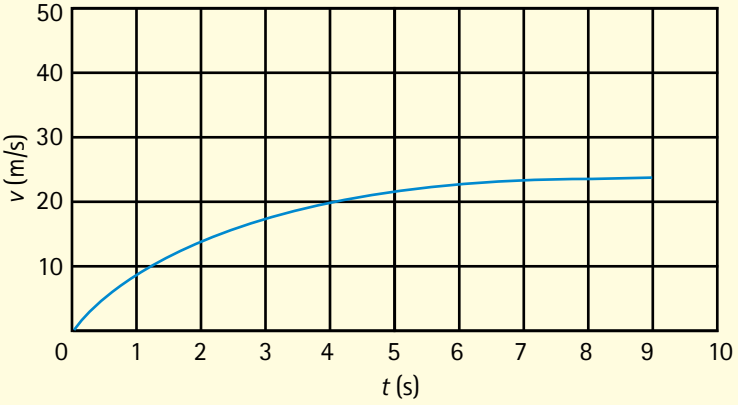



**FIGURA C.7**

1. ¿Cuánto tardará la bola en golpear el fondo?
2. ¿Cuál era la rapidez de la bola cuando golpeó el fondo?
3. ¿Qué te dice la disminución de la pendiente de la gráfica acerca de la aceleración de la bola con el aumento de rapidez?
4. ¿La bola alcanzó una rapidez terminal antes de golpear el fondo del pozo? Si es así, ¿aproximadamente cuántos segundos tardó en llegar a su rapidez terminal?
5. ¿Cuál es la profundidad aproximada del pozo de la mina?

## COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. 9 s.
2. 24 m/s.
3. La aceleración disminuye conforme la rapidez aumenta (debido a resistencia del aire).
4. Sí (dado que la pendiente se curva a cero), aproximadamente 7 s.
5. La profundidad es de unos 170 m. (El área bajo la curva es de más o menos 17 cuadrados, cada uno de los cuales representa 10 m.)

APÉNDICE D

# Aplicaciones de los vectores

Los vectores se presentaron en los Capítulos 2-5. Recuerda que una cantidad vectorial es una cantidad dirigida, especificada tanto por su magnitud como por su dirección. Los vectores pueden representarse con flechas, donde la longitud de la flecha corresponde a la magnitud y la punta de la flecha muestra la dirección. Los vectores que se suman son *vectores componentes*. La suma de los vectores componentes es la *resultante*.

## Ejemplos de vectores y sus componentes

1. Ernie Brown empuja una podadora y aplica una fuerza que la empuja hacia adelante y también contra el suelo. En la Figura D.1, **F** representa la fuerza aplicada por Ernie. Esta fuerza puede separarse en dos componentes. El vector **D** representa la componente descendente, y **S** es la componente lateral, la fuerza que mueve la podadora hacia adelante. Si conoces la magnitud y la dirección del vector **F**, puedes estimar la magnitud de las componentes a partir del diagrama vectorial.

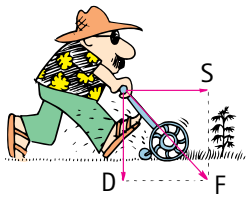



FIGURA D.1

2. ¿Sería más fácil empujar o jalar una carretilla arriba de un escalón? La Figura D.2 muestra la fuerza en el centro de la rueda. Cuando empujas una carretilla, parte de la fuerza se dirige hacia abajo, lo que hace más difícil subir el escalón. Sin embargo, cuando la jalas, parte de la fuerza del jalón se dirige hacia arriba, lo que ayuda a levantar la rueda sobre el escalón. Observa que el diagrama vectorial sugiere que empujar la carretilla puede que no suba la carretilla en absoluto. ¿Ves que la altura del escalón, el radio de la rueda y el ángulo de la fuerza aplicada determinan si la carretilla puede empujarse sobre el escalón? ¡Observa cómo los vectores ayudan a analizar una situación y ver justo cuál es el problema!

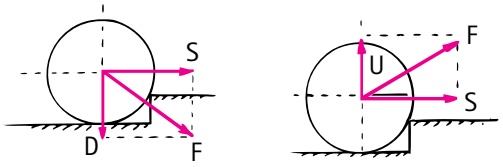



FIGURA D.2

3. Si consideras las componentes del peso de un objeto que rueda por un plano inclinado, puedes ver por qué su rapidez depende del ángulo. Observa que cuanto más inclinado sea el plano, más grande se vuelve la componente **S** y más rápido rueda el objeto. Cuando el plano es vertical, **S** se vuelve igual al peso y el objeto logra una máxima aceleración, 9.8 m/s$^2$. Hay dos vectores más de fuerza que no se muestran: la fuerza normal **N**, que es igual y tiene dirección opuesta a **D**, y la fuerza de fricción **f**, que actúa en el contacto entre el barril y el plano.

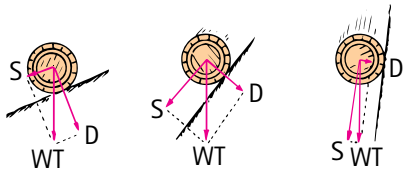



FIGURA D.3

4. Cuando el aire en movimiento golpea la superficie inferior del ala de un avión, la fuerza del aire que impacta contra el ala puede representarse con un solo vector perpendicular al plano del ala (Figura D.4). El vector de fuerza se representa actuando a medio camino a lo largo de la superficie inferior del ala, donde está el punto, y apunta arriba del ala para mostrar la dirección resultante de la fuerza de impacto del viento. Esta fuerza puede descomponerse en dos componentes, una lateral y la otra hacia arriba. La componente ascendente, **U**, se llama *sustentación*. El componente lateral, **S**, se llama *arrastre aerodinámico*. Si el avión debe volar con una velocidad constante a altitud constante, entonces la sustentación debe ser igual al peso del avión y el empuje de los motores del avión debe ser igual al arrastre. La magnitud de la sustentación (y el arrastre) puede alterarse si se cambia la rapidez del avión o el ángulo (llamado *ángulo de ataque*) entre el ala y la horizontal.

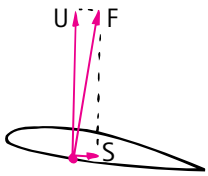



FIGURA D.4

5. Considera el satélite que se mueve en sentido de las manecillas del reloj en la Figura D.5. En cada parte de su trayectoria orbital, la fuerza gravitacional **F** lo jala hacia el centro del planeta huésped. En la posición A, se ve a **F** separado en dos componentes: **f**, que es tangente a la trayectoria del proyectil, y **f′**, que es

perpendicular a la trayectoria. Las magnitudes relativas de estas componentes en comparación con la magnitud de **F** pueden verse en el rectángulo imaginario que componen; **f** y **f′** son los lados, y **F** es la diagonal. Se ve que la componente **f** está a lo largo de la trayectoria orbital pero contra la dirección del movimiento del satélite. Esta componente de fuerza reduce la rapidez del satélite. La otra componente, **f′**, cambia la dirección del movimiento del satélite y lo aleja de su tendencia a ir en línea recta. De modo que la trayectoria del satélite se curva. El satélite pierde rapidez hasta que llega a la posición B. En el punto más alejado del planeta (apogeo), la fuerza gravitacional es un poco más débil pero perpendicular al movimiento del satélite, y la componente **f** se reduce a cero. La componente **f′**, por otra parte, aumentó y ahora se fusiona por completo para convertirse en **F**. La rapidez en este punto no es suficientemente alta como para una órbita circular, y el satélite comienza a caer hacia el planeta. Adquiere una rapidez porque la componente **f** reaparece y está en la dirección del movimiento, como se muestra en la posición C. El satélite adquiere rapidez hasta que pasa alrededor de la posición D (perigeo), donde una vez más la dirección del movimiento es perpendicular a la fuerza gravitacional, **f′** se convierte por completo en **F**, y **f** no existe. La rapidez excede a la necesaria para una órbita circular a esta distancia, y el satélite pasa rápidamente para repetir el ciclo. Su pérdida de rapidez al ir de D a B iguala su ganancia en rapidez de B a D. Kepler descubrió que las trayectorias planetarias son elípticas, pero nunca supo por qué. ¿Tú lo sabes?

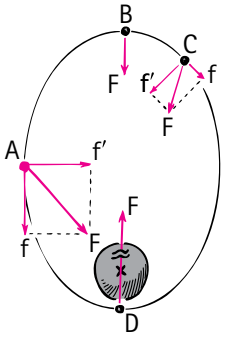


FIGURA D.5

6. Remítete a los Polaroid sostenidos por Ludmila en la Figura 29.34 del Capítulo 29.
En la primera imagen (a), se ve que la luz se transmite a través del par de Polaroid porque sus ejes están alineados. La luz que sale puede representarse como un vector alineado con el eje de polarización de los Polaroid. Cuando los Polaroid se cruzan (b), no sale luz porque la luz que atraviesa el primer Polaroid es perpendicular al eje de polarización del segundo Polaroid, sin componentes a lo largo de su eje. En la tercera imagen (c), se ve que la luz se transmite cuando un tercer Polaroid queda en medio en un ángulo entre los Polaroid cruzados. La explicación de esto se muestra en la Figura D.6.

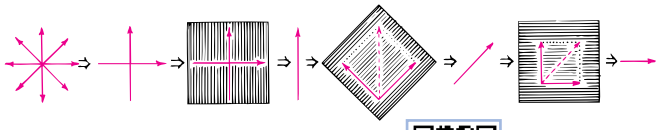


FIGURA D.6

# Botes de vela

**SCREENCAST: Bote de vela en el viento**

Los marineros siempre han sabido que un bote de vela puede navegar a sotavento, en la dirección del viento. Sin embargo, los marineros no siempre han sabido que un bote de vela puede navegar a barlovento, contra el viento. Una razón para esto tiene que ver con una característica que es común sólo en los botes de vela recientes: una quilla con forma de aleta que se extiende profundo bajo el fondo del bote para garantizar que el bote cortará a través del agua sólo en dirección hacia adelante (o hacia atrás). Sin una quilla, un bote de vela podría voltearse hacia los lados.

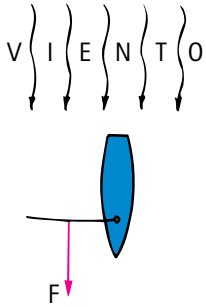
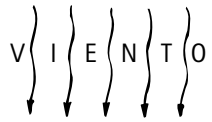


FIGURA D.7

La Figura D.7 muestra un bote de vela que navega directamente a sotavento. La fuerza del viento que impacta contra la vela acelera al bote. Incluso si el arrastre del agua y todas las otras fuerzas de resistencia son despreciables, la rapidez máxima del bote es la rapidez del viento. Esto se debe a que el viento no hará un impacto contra la vela si el bote se mueve tan rápido como el viento. El viento no tendría una rapidez relativa con el bote y la vela simplemente se pandearía. Sin fuerza, no hay aceleración. El vector de fuerza en la Figura D.7 *disminuye* conforme el bote viaja más rápido. El vector de fuerza es máximo cuando el bote está en reposo y todo el impacto del viento llena la vela, y es mínimo cuando el bote viaja tan rápido como el viento. Si el bote de algún modo es impulsado hasta una rapidez mayor que la del viento (mediante un motor, por ejemplo), entonces la resistencia del aire contra el lado frontal de la vela producirá un vector de fuerza con dirección opuesta. Esto frenará al bote. Por tanto, el bote, cuando se impulsa sólo por el viento, no puede superar la rapidez del viento.

Si la vela se orienta en un ángulo con respecto al viento, como se muestra en la Figura D.8, el bote se moverá hacia adelante, pero con menos aceleración. Existen dos razones para esto:



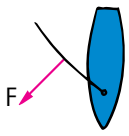



FIGURA D.8

1. La fuerza sobre la vela es menor porque la vela no intercepta tanto viento en esta posición angular.
2. La dirección de la fuerza de impacto del viento sobre la vela no

está en la dirección de movimiento del bote sino que es perpendicular a la superficie de la vela. En términos generales, siempre que cualquier fluido (líquido o gas) interactúa con una superficie lisa, la fuerza de interacción es perpendicular a la superficie lisa.* El bote no se mueve en la misma dirección que la fuerza perpendicular sobre la vela, sino que está restringido a moverse en una dirección hacia adelante (o hacia atrás) por su quilla.

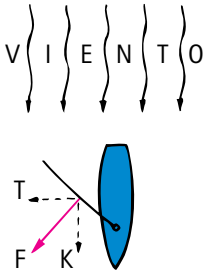


FIGURA D.9

Puedes comprender mejor el movimiento del bote si descompones la fuerza del impacto del viento, **F**, en componentes perpendiculares. La componente importante es aquella que es paralela a la quilla, que se etiqueta **K**, y la otra componente es perpendicular a la quilla, que se etiqueta **T**. La componente **K**, como se muestra en la Figura D.9, es la que se encarga del movimiento hacia adelante del bote. La componente **T** es una fuerza inútil que tiende a inclinar al bote y a moverlo hacia los lados. Esta fuerza componente se compensa con la quilla profunda. De nuevo, la rapidez máxima del bote no puede ser mayor que la rapidez del viento.

Muchos botes de vela que navegan en direcciones distintas a la de sotavento exactamente (Figura D.10) con sus velas orientadas de manera adecuada pueden superar la rapidez del viento. En el caso de un bote de vela que corta el viento, el viento puede seguir impactando con la vela incluso después de que el bote supere la rapidez del viento. Un surfista, en forma similar, supera la velocidad de la onda impulsora al angular su tabla de surf a través de la ola. Ángulos mayores con respecto al medio impulsor (el viento para el bote, una ola para la tabla de surf) resultan en mayores rapideces.

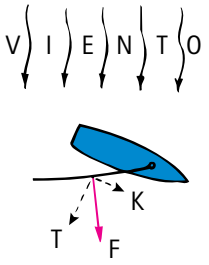
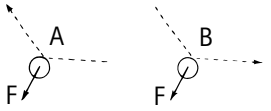


FIGURA D.10

*Puedes hacer un ejercicio sencillo para ver que esto es así. Intenta hacer rebotar una moneda sobre otra encima de una superficie lisa, como se muestra. Observa que la moneda golpeada se mueve en ángulo recto (perpendicular) al borde de contacto. Observa también que no hay diferencia si la moneda proyectada se mueve a lo largo de la trayectoria A o de la trayectoria B. Consulta con tu instructor para que te dé una explicación más rigurosa, que incluya la conservación de la cantidad de movimiento.




Un vehículo con vela puede navegar más rápido cortando el viento de lo que puede hacerlo navegando a sotavento.

Por extraño que parezca, para lograr la rapidez máxima en la mayoría de los vehículos con vela se corta (contra) el viento; esto es, ¡al angular el vehículo en una dirección a barlovento! Aunque un bote de vela no puede navegar directamente a barlovento, puede llegar a un destino a barlovento al angular de ida y vuelta en zigzag. A esto se le llama *virar*. Supón que el bote y la vela están como se muestra en la Figura D.11. La componente K empujará al bote a lo largo de una dirección hacia adelante, angulando hacia el viento. En la posición mostrada, el bote puede navegar más rápido que la rapidez del viento. Esto se debe a que, conforme el bote viaja más rápido, el impacto del viento aumenta. Esto es similar a correr en una lluvia que viaja en ángulo. Cuando corres en contra de la dirección en que cae el aguacero, las gotas te impactan con mayor intensidad y frecuencia. Cuando corres en la dirección de caída de la lluvia, las gotas no te golpean tan fuerte o con tanta frecuencia. De la misma forma, un bote que navega a barlovento experimenta una mayor fuerza de impacto del viento, mientras que un bote que navega a sotavento experimenta una reducción de la fuerza de impacto del viento. En cualquier caso, el bote alcanza su rapidez terminal cuando las fuerzas que se oponen cancelan la fuerza producida por el impacto del viento. Las fuerzas opuestas consisten principalmente en la resistencia del agua contra el casco del bote. Los cascos de los botes de carreras se construyen para reducir al mínimo esta fuerza de resistencia, que es el principal freno para adquirir grandes rapideces.

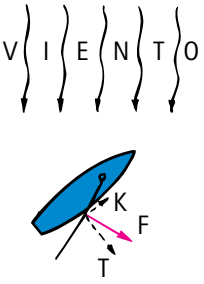


FIGURA D.11

Los barcos para navegar sobre hielo (vehículos con vela equipados con rieles que sirven como "quillas" para viajar sobre el hielo) no encuentran resistencia del agua y pueden viajar a varias veces la rapidez del viento cuando viran a barlovento. Aunque casi no hay fricción del hielo, un barco para hielo no acelera sin límites. La velocidad terminal de estos vehículos está determinada no sólo por fuerzas de fricción opuestas, sino también por el cambio en la dirección relativa del viento. Cuando la orientación y la rapidez del bote son tales que el viento parece cambiar de dirección, de modo que el viento se mueve paralelo a la vela en lugar de hacia ella, cesa la aceleración hacia adelante, al menos en el caso de una vela plana. En la práctica, las velas son curvas y producen un plano aerodinámico que es tan importante para los vehículos de vela como para los aviones, como estudiaste en el Capítulo 14.

APÉNDICE E

# Crecimiento exponencial y tiempo de duplicación*

**SCREENCAST:** Crecimiento exponencial

Una de las cosas más importantes que parece imposible percibir es el proceso del crecimiento exponencial. Uno cree que entiende cómo funciona el interés compuesto, pero no puede comprender que una fina hoja de papel tisú doblada sobre sí misma 50 veces (si eso fuera posible) tendría más de 20 millones de kilómetros de grueso. De lo contrario, uno podría "ver" por qué el poder de compra sólo es de la mitad de lo que era hace un par de décadas, por qué el precio de todo se ha duplicado en el mismo tiempo y por qué las poblaciones y los contaminantes proliferan fuera de control.**

Cuando una cantidad como el dinero en el banco, la población o la tasa de consumo de un recurso crece de manera estable a un porcentaje fijo cada año, se dice que el crecimiento es *exponencial*. Lo importante del crecimiento exponencial es que el tiempo necesario para que la cantidad duplique su tamaño (aumente en 100%) también es constante. Por ejemplo, si la población de una ciudad en crecimiento tarda 12 años en duplicarse de 10,000 a 20,000 habitantes y su crecimiento permanece estable, en los próximos 12 años la población se duplicará a 40,000, y en los próximos 10 años a 80,000, y así sucesivamente.

Hay una importante relación entre la tasa de crecimiento porcentual y su *tiempo de duplicación*, el tiempo que tarda en duplicarse una cantidad:†

$$\text{Tiempo de duplicación} = \frac{69.3}{\text{crecimiento porcentual por unidad de tiempo}} \approx \frac{70}{\%}$$

De este modo, para estimar el tiempo de duplicación de una cantidad que crece de manera estable, divide el número 70 entre la tasa de crecimiento porcentual. Por ejemplo, la tasa de crecimiento de 7% de la capacidad de generación de energía eléctrica en Estados Unidos significa que en el pasado la capacidad se había duplicado cada 10 años [70%/(7%/año) = 10 años]. Una tasa de crecimiento de 2% de la población mundial significa que la población del mundo se duplica cada 35 años [70%/(2%/año) = 35 años]. Una comisión de planificación de la ciudad que acepta lo que parece ser una modesta tasa de crecimiento porcentual de 3.5 puede no darse cuenta de que esto significa que la duplicación ocurrirá en 70/3.5, o 20 años; esto es el doble de la capacidad para cosas como el suministro de agua, plantas de tratamiento de aguas negras y otros servicios municipales cada 20 años.

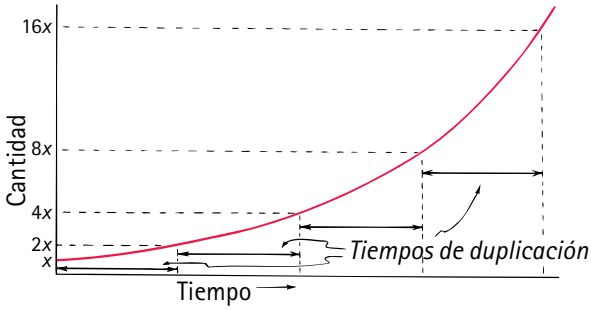



**FIGURA E.1**
Una curva exponencial. Observa que cada uno de los sucesivos intervalos de tiempo iguales anotados sobre la escala horizontal corresponde a una duplicación de la cantidad indicada sobre la escala vertical. A dicho intervalo se le llama tiempo de duplicación.

¿Qué ocurre cuando colocas un crecimiento estable en un ambiente finito? Piensa en el crecimiento de las bacterias que crecen por división, de modo que una bacteria se convierte en dos, las dos se dividen y se convierten en cuatro, las cuatro se dividen y se convierten en ocho, y así sucesivamente. Supón que el tiempo de división de una cepa determinada de bacterias es de 1 minuto. Entonces, esto es un crecimiento estable: el número de bacterias crece exponencialmente con un tiempo de duplicación de 1 minuto. Más aún, supón que una bacteria se pone en una botella a las 11:00 a.m. y que el crecimiento continúa de manera estable hasta que la botella está llena de bacterias a las 12 del mediodía. Piensa seriamente la siguiente pregunta.

**FIGURA E.2**

*Este apéndice está adaptado del material escrito por el profesor de física de la University of Colorado, Albert A. Bartlett, quien afirma: "el mayor defecto de la especie humana es su incapacidad para entender la función exponencial". Consulta en Internet más acerca de Al Bartlett.

**Consulta K. C. Cole, *Sympathetic Vibrations* (Nueva York: Morrow, 1984).

†Para el decaimiento exponencial se habla de vida media, el tiempo necesario para que una cantidad se reduzca a la mitad de su valor. Este caso se trata en el Capítulo 33.

**PUNTO DE CONTROL**
¿En qué momento la botella se llena a la mitad?

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**
A las 11:59 a.m.; ¡las bacterias duplicarán su número cada minuto!

Es asombroso observar que, 2 minutos antes del mediodía, la botella estaba sólo ¼ llena. La Tabla E.1 resume la cantidad de espacio que queda en la botella en los últimos minutos antes de mediodía. Si fueras una bacteria promedio en la botella, ¿en qué momento te darías cuenta de que te estás quedando sin espacio? Por ejemplo, ¿sentirías que hay un serio problema a las 11:55 a.m., cuando la botella está sólo 3% llena (1/32) y tienes 97% de espacio abierto (sólo anhelando el desarrollo)? El punto aquí es que no hay mucho tiempo entre el momento en que los efectos del crecimiento se vuelven apreciables y el tiempo en que se vuelven abrumadores.

**TABLA E.1 LOS ÚLTIMOS MINUTOS EN LA BOTELLA**

| Tiempo | Parte llena (%) | Parte vacía |
|---|---|---|
| 11:54 a.m. | 1/64 (1.6%) | 63/64 |
| 11:55 a.m. | 1/32 (3%) | 31/32 |
| 11:56 a.m. | 1/16 (6%) | 15/16 |
| 11:57 a.m. | 1/8 (12%) | 7/8 |
| 11:58 a.m. | 1/4 (25%) | 3/4 |
| 11:59 a.m. | 1/2 (50%) | 1/2 |
| 12:00 mediodía | llena (100%) | ninguna |

Supón que a las 11:58 a.m. algunas bacterias previsoras ven que se están quedando sin espacio y lanzan una búsqueda a gran escala de nuevas botellas. Por fortuna, a las 11:59 a.m. descubren tres nuevas botellas vacías, tres veces más espacio de lo que habían conocido. Esto cuadruplica el espacio de recursos total jamás conocido para las bacterias, porque ahora tienen un total de cuatro botellas, mientras que antes del descubrimiento sólo tenían una. Supón ahora que, gracias a su destreza tecnológica, pueden migrar hacia sus nuevos hábitats sin dificultad. Con seguridad, para la mayoría de las bacterias parecerá que su problema está resuelto, y justo a tiempo.

**PUNTO DE CONTROL**
Si el crecimiento de las bacterias continúa a la tasa invariable, ¿qué hora será cuando las tres nuevas botellas estén llenas a toda su capacidad?

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**
¡12:02 p.m.!

En la Tabla E.2 se ve que cuadruplicar los recursos extiende la vida del recurso sólo dos tiempos de duplicación. En el ejemplo el recurso es el espacio, pero bien pudiera ser carbón, petróleo, uranio o cualquier recurso no renovable.

**TABLA E.2 EFECTOS DEL DESCUBRIMIENTO DE TRES NUEVAS BOTELLAS**

| Tiempo | Efecto |
|---|---|
| 11:58 a.m. | Botella 1 está 1/4 llena |
| 11:59 a.m. | Botella 1 está 1/2 llena |
| 12:00 mediodía | Botella 1 está llena |
| 12:01 p.m. | Botellas 1 y 2 están ambas llenas |
| 12:02 p.m. | Botellas 1, 2, 3 y 4 están todas llenas |

El crecimiento continuo y la duplicación continua conducen a números enormes. En dos tiempos de duplicación, una cantidad duplicará dos veces su tamaño ($2^2 = 4$; cuádruple); en tres tiempos de duplicación, su tamaño aumentará ocho veces ($2^3 = 8$); en cuatro tiempos de duplicación, aumentará dieciséis veces ($2^4 = 16$); y así sucesivamente.

Este crecimiento se ilustra mejor con la historia del matemático de la corte en India quien años atrás inventó el ajedrez para su rey. El rey estaba tan complacido con el juego, que ofreció recompensar al matemático, cuya petición parecía bastante modesta. El matemático solicitó un solo grano de trigo en la primera casilla del tablero, dos granos en la segunda casilla, cuatro en la tercera casilla, etc., duplicando el número de granos en cada casilla sucesiva hasta usar todas las casillas. A esta tasa habría $2^{63}$ granos de trigo en la casilla 64. El rey pronto vio que no podría satisfacer esta "modesta" petición, ¡que representaba más trigo del que se había cosechado en toda la historia del planeta Tierra!

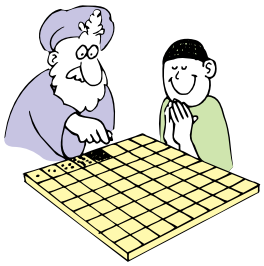


**FIGURA E.3**
Un solo grano de trigo colocado en la primera casilla del tablero de ajedrez se duplica en la segunda casilla, este número se duplica en la tercera, y así sucesivamente, presumiblemente para las 64 casillas. Observa que cada casilla contiene un grano más que todas las casillas anteriores combinadas. ¿Existe suficiente trigo en el mundo para llenar las 64 casillas de esta manera?

Es interesante e importante observar que el número de granos en cualquier casilla es un grano más que el total de todos los granos de las casillas anteriores. Esto es cierto en cualquier parte del tablero. Observa en la Tabla E.3 que, cuando se colocan ocho granos en la cuarta casilla, el ocho es uno más que el total de siete granos que ya había en el tablero. O los 32 granos colocados en la sexta casilla es uno más que el total de 31 granos que ya había en el tablero. ¡Se

**TABLA E.3 LLENADO DE LAS CASILLAS EN EL TABLERO DE AJEDREZ**

| Número al cuadrado | Granos en la casilla | Granos totales hasta aquí |
|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 3 |
| 3 | 4 | 7 |
| 4 | 8 | 15 |
| 5 | 16 | 31 |
| 6 | 32 | 63 |
| 7 | 64 | 127 |
| . | . | . |
| . | . | . |
| . | . | . |
| 64 | $2^{63}$ | $2^{64} - 1$ |

ve que, en un tiempo de duplicación, se usa más que todo lo que se ha usado en todos los crecimientos anteriores!

De este modo, si se habla de duplicar el consumo de energía en los siguientes años, ten en mente que esto significa que en estos años se consumirá más energía de la que hasta el momento se haya consumido durante todo el periodo anterior de crecimiento sostenido. Y si la generación de energía sigue usando de manera predominante combustibles fósiles, entonces, excepto por algunas mejoras en la eficiencia, en el siguiente tiempo de duplicación se quemaría mayor cantidad de carbón, petróleo y gas natural que el ya consumido por la generación previa de energía, y excepto por mejoras en el control de la contaminación, puedes esperar que se viertan incluso más desechos tóxicos al ambiente que los millones de millones de toneladas ya vertidos durante todos los años previos de civilización industrial. ¡También podrías esperar que más calorías de calor producidas por los seres humanos se absorban en los ecosistemas de la Tierra de las que se han absorbido en todo el pasado! A la anterior tasa de crecimiento anual de 7% en la producción de energía, todo esto ocurriría en un tiempo de duplicación de una sola década. Si durante los años venideros la tasa de crecimiento anual permanece a la mitad de este valor, 3.5%, entonces todo esto tendría lugar en un tiempo de duplicación de dos décadas. ¡Es evidente que esto no puede continuar!

El consumo de un recurso no renovable no puede crecer exponencialmente durante un periodo indefinido, puesto que el recurso es finito y su suministro al final expira. La forma más drástica en que esto podría ocurrir se muestra en la Figura E.4a, donde la tasa de consumo, como la de barriles de petróleo por año, se grafica contra el tiempo, por decir en años. En tal gráfica el área bajo la curva representa el suministro del recurso. Se ve que, cuando el suministro se agota, el consumo cesa por completo. Este cambio súbito rara vez ocurre debido a que la tasa de extracción del suministro disminuye conforme el recurso se vuelve más escaso. Esto se muestra en la Figura E.4b. Observa que el área bajo la curva es igual al área bajo la curva de la Figura E.4a. ¿Por qué? Porque el suministro total es el mismo en ambos casos. La principal diferencia es el tiempo que transcurre hasta que al final se extingue el suministro. La historia muestra que la tasa de producción de un recurso no renovable aumenta y desciende en una forma casi simétrica, como se muestra en la Figura E.4c. El tiempo durante el cual suben las tasas de producción es aproximadamente igual al tiempo durante el cual estas tasas descienden a cero o cerca de cero.

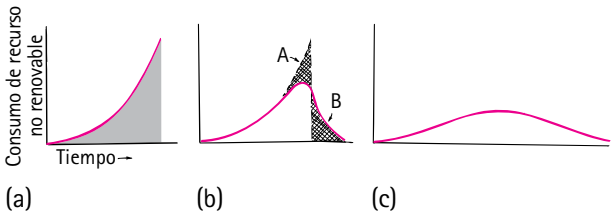



**FIGURA E.4**

(a) Si la tasa exponencial de consumo de un recurso no renovable continúa hasta que el recurso se agota, el consumo desciende de manera abrupta a cero. El área sombreada bajo esta curva representa el suministro total del recurso. (b) En la práctica, la tasa de los niveles de consumo se estabiliza y luego desciende menos abruptamente hasta cero. Observa que el área rayada A es igual al área rayada B. ¿Por qué? (c) A tasas más bajas de consumo, el mismo recurso dura más tiempo.

Las tasas de producción de todos los recursos no renovables disminuyen tarde o temprano. Sólo las tasas de producción de los recursos renovables, como la agricultura o los productos forestales, se pueden mantener en niveles estables durante periodos prolongados (Figura E.5), siempre y cuando dicha producción no dependa de la mengua de recursos no renovables como el petróleo. Mucha de la agricultura de hoy depende tanto del petróleo que puede decirse que la agricultura moderna es simplemente el proceso mediante el cual la tierra se utiliza para convertir petróleo en alimento.

Las repercusiones de la escasez del petróleo no se limitan a racionar la gasolina para los automóviles o el petróleo para el calentamiento de las casas. Las consecuencias del crecimiento exponencial no controlado son impactantes.

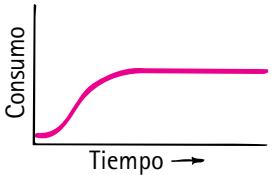



**FIGURA E.5**

Una curva que muestra la tasa de consumo de un recurso renovable como la agricultura o los productos forestales, donde una tasa estable de producción y consumo pueden mantenerse durante largo tiempo siempre y cuando esta producción no dependa del uso de un recurso no renovable cuyo suministro esté disminuyendo.

Es importante preguntar: ¿el crecimiento realmente es bueno? Para responder esta pregunta, ten en mente que el crecimiento humano está en una fase temprana de vida que continúa normalmente a través de la adolescencia. El crecimiento físico se detiene cuando se alcanza la madurez física. ¿Qué puede decirse del crecimiento que continúa en el periodo de madurez física? Se dice que tal crecimiento es la obesidad… o peor, un cáncer.

## PREGUNTAS PARA REFLEXIONAR

1. De acuerdo con un acertijo francés, un lirio acuático comienza con una sola hoja. Cada día se duplica el número de hojas, hasta que el estanque está cubierto por completo de hojas en el día 30. ¿En cuál día el estanque está cubierto a la mitad? ¿Cubierto en una cuarta parte?
2. Piensa en una economía que tiene una tasa de inflación estable de 3.5% al año. En tal economía, ¿en cuántos años un dólar pierde la mitad de su valor?
3. Considera una tasa de inflación estable de 3.5%. A esta tasa, ¿cuál será el precio de un boleto de teatro, que ahora cuesta $50, cada 20 años durante los próximos 60 años? ¿De un abrigo que ahora cuesta $500? ¿De un automóvil que ahora cuesta $50,000? ¿De una casa que ahora cuesta $500,000?
4. Si la planta de tratamiento de aguas negras de una ciudad apenas es suficiente para la población actual de la ciudad, ¿cuántas plantas de tratamiento de aguas negras se necesitarán 42 años después si la ciudad crece de manera estable a 5% anual?
5. Si la población anual se duplica en 40 años y la producción mundial de alimentos también se duplica en 40 años, ¿cuántas personas morirán de hambre cada año en comparación con el momento actual?
6. Supón que consigues que un posible empleador acepte contratar tus servicios por un salario de un solo centavo el primer día, 2 centavos el segundo día, y duplicar la cantidad cada día de ahí en adelante, siempre que el empleador se mantenga en lo acordado durante un mes. ¿Cuál será tu salario total del mes?
7. En la pregunta anterior, ¿cuál sería la diferencia entre tu salario de sólo el día 30 y el salario total de los 29 días anteriores?
8. Si en la actualidad pudiera utilizarse una planta de fusión, la abundante energía que resultara probablemente sostendría e incluso alentaría aún más el apetito actual de crecimiento continuo y en relativamente pocos tiempos de duplicación produciría una fracción importante de la entrada de energía solar a la Tierra. Plantea un argumento que demuestre que la demora actual en el aprovechamiento de la fusión es una bendición para la especie humana.

# Respuestas a problemas con número impar

## Respuestas a Exámenes de práctica de opción múltiple

**PARTE UNO**
**1.** A **2.** C **3.** D **4.** C **5.** B **6.** C **7.** A
**8.** B **9.** A **10.** B **11.** B **12.** A **13.** B
**14.** C **15.** B **16.** A **17.** D **18.** B **19.** D
**20.** A **21.** A **22.** C **23.** A **24.** B **25.** B
**26.** B **27.** A **28.** A **29.** B **30.** A

**PARTE DOS**
**1.** D **2.** B **3.** B **4.** A **5.** A **6.** C **7.** A **8.** C
**9.** A **10.** D **11.** B **12.** D **13.** A **14.** A
**15.** C **16.** B **17.** D **18.** D **19.** A **20.** B

**PARTE TRES**
**1.** C **2.** C **3.** B **4.** C **5.** A **6.** A **7.** A
**8.** C **9.** C **10.** C **11.** A **12.** A **13.** B
**14.** C **15.** A **16.** C **17.** C **18.** B **19.** C
**20.** C **21.** B **22.** B **23.** B **24.** A **25.** C
**26.** D **27.** D **28.** A **29.** A **30.** B

**PARTE CUATRO**
**1.** B **2.** B **3.** A **4.** D **5.** B **6.** B **7.** A
**8.** D **9.** D **10.** C **11.** B **12.** D **13.** D
**14.** C **15.** C **16.** C **17.** A **18.** D **19.** B
**20.** A **21.** D **22.** A **23.** D **24.** B **25.** B
**26.** B **27.** D **28.** B **29.** B **30.** B

**PARTE CINCO**
**1.** C **2.** A **3.** B **4.** B **5.** C **6.** B **7.** D
**8.** C **9.** C **10.** A **11.** D **12.** D **13.** B
**14.** B **15.** B **16.** B **17.** A **18.** D **19.** A
**20.** A **21.** D **22.** A **23.** C **24.** A **25.** B
**26.** D **27.** A **28.** A **29.** C **30.** D

**PARTE SEIS**
**1.** B **2.** A **3.** B **4.** D **5.** B **6.** C **7.** A
**8.** B **9.** D **10.** C **11.** A **12.** C **13.** A
**14.** C **15.** D **16.** B **17.** A **18.** A **19.** A
**20.** B **21.** C **22.** A **23.** B **24.** A **25.** D
**26.** D **27.** C **28.** D **29.** B **30.** B

**PARTE SIETE**
**1.** A **2.** B **3.** A **4.** C **5.** B **6.** D **7.** C
**8.** C **9.** B **10.** B **11.** A **12.** A **13.** C
**14.** B **15.** A **16.** B **17.** A **18.** C **19.** D
**20.** C **21.** D **22.** A **23.** A **24.** A **25.** A
**26.** B **27.** A **28.** A **29.** C **30.** D

**PARTE OCHO**
**1.** B **2.** D **3.** B **4.** B **5.** B **6.** B **7.** D
**8.** A **9.** A **10.** A **11.** C **12.** C **13.** A
**14.** C **15.** D **16.** B **17.** D **18.** B

## Respuestas a problemas con número impar

### Capítulo 1

#### Preguntas conceptuales

**1.** La *ciencia* es el producto de la curiosidad humana de saber cómo funciona el mundo: un cuerpo organizado de conocimiento que describe el orden y las causas dentro de la naturaleza y una actividad humana en marcha dedicada a recopilar y organizar el conocimiento acerca del mundo. **3.** Alejandría estaba más al norte, a una latitud más alta. **5.** Al igual que el Sol, el diámetro de la Luna es 1/110 de la distancia entre la Tierra y la Luna. **7.** En la época de media Luna, sabía que el ángulo entre una línea que unía la Luna y la Tierra estaba a 90° con respecto a la línea que unía a la Luna y el Sol. **9.** Las ecuaciones son guías del pensamiento que muestran las conexiones entre los conceptos en la naturaleza. **11.** La respuesta es como se señaló en el Resumen de términos. **13.** Una hipótesis científica debe ser susceptible de ponerse a prueba. **15.** Ve si puedes establecer la posición de un antagonista en beneficio del antagonista, y compara qué tan bien el antagonista puede establecer tu posición. Si puedes, y tu antagonista no puede, la probabilidad es que tú estés correcto en tu posición. **17.** No. La ciencia y la religión pueden funcionar bien juntas e incluso complementarse entre sí. (Sin embargo, los extremistas religiosos pueden afirmar que las dos son incompatibles.) **19.** La ciencia tiene que ver con recopilar conocimiento y organizarlo; la tecnología le da al conocimiento científico un uso práctico y proporciona los instrumentos que los científicos necesitan para realizar sus investigaciones.

#### Piensa y realiza

**21.** El triángulo que proyecta la imagen sobre la moneda desde el agujero en la cartulina es semejante al triángulo más grande que se proyecta hasta el Sol desde la cartulina, de modo que el número de monedas y de soles es el mismo. El número de soles que cabrían entre la superficie de la Tierra y el Sol es 110.

#### Piensa y explica

**23.** La sanción por fraude es la excomunión profesional. **25.** La hipótesis de Aristóteles era parcialmente correcta. El material de la planta proviene en parte del suelo, pero sobre todo del aire y el agua. Un experimento consistiría en pesar una maceta con tierra y una pequeña semilla, luego pesar la maceta con la planta después de que ésta haya crecido. El hecho de que la planta crecida pese más es evidencia de que la planta está compuesta de más material del que ofrece la tierra. Lleva un registro del peso del agua usada para regar la planta y cubre la tierra con plástico para reducir al mínimo las pérdidas por evaporación. Luego, el peso de la planta crecida puede compararse con el peso del agua que absorbe. ¿Cómo puede estimarse el peso del aire tomado por la planta? **27.** Lo que generalmente no se entiende es la diferencia entre teoría e hipótesis. En el uso común, una "teoría" puede significar una suposición o hipótesis, algo que es tentativo o especulativo. Pero en ciencia, una teoría es una síntesis de un gran cuerpo de información validada (por ejemplo, la teoría celular o la teoría cuántica). El valor de una teoría es su utilidad (no su "veracidad"). **29.** La sombra sería más larga porque en el planeta más pequeño el ángulo del poste sería mayor con relación a la luz solar. La razón entre la sombra y la altura del poste sería mayor que 1 a 8.

#### Piensa y discute

**31.** Los ejemplos son interminables. El conocimiento de la electricidad, por ejemplo, ha demostrado ser en extremo útil. El número de personas que han sido lesionadas por la electricidad y que la entienden es mucho menor al número de personas que han sido lesionadas por ella y no la entienden. El temor a la electricidad es mucho más dañino que útil para la salud general y la actitud de las personas.

### Capítulo 2

#### Preguntas conceptuales

**1.** Aristóteles clasificó el movimiento de la Luna como natural. **3.** Copérnico afirmó que la Tierra da vueltas alrededor del Sol, no del modo contrario. **5.** Galileo descubrió que un objeto en movimiento continuará en movimiento sin la necesidad de una fuerza. **7.** La ley de Newton es una reafirmación del concepto de inercia de Galileo. **9.** La fuerza neta es de 70 libras a la derecha. **11.** La

diagonal del paralelogramo representa la resultante del par de vectores. **13.** La tensión en cada soga sería de la mitad del peso de Nellie. **15.** La fuerza neta es cero. **17.** Todas las fuerzas sobre algo en equilibrio mecánico vectorialmente suman cero. **21.** Sí. La bola que se mueve con rapidez constante en línea recta está en equilibrio dinámico. **23.** La fuerza de fricción es de 100 N. **25.** El ave todavía se mueve a 30 km/s con respecto al Sol.

**Piensa y resuelve**

**27.** Debido a que cada báscula registra 350 N, el peso total de Lucy es de 700 N. **29.** De acuerdo con la regla de equilibrio, $\Sigma F = 0$, las fuerzas ascendentes son 800 N y las fuerzas descendentes son 500 N + el peso del andamio. De modo que el andamio debe pesar 300 N.

**Piensa y clasifica**

**31.** C, B, A. **33.** (a) B, A, C, D; (b) B, A, C, D **35.** B, A, C

**Piensa y explica**

**37.** Aristóteles privilegiaba la lógica filosófica, en tanto que Galileo privilegiaba la experimentación. **39.** Copérnico y otros de su época pensaban que una fuerza enorme tendría que empujar de manera continua la Tierra para mantenerla en movimiento. No estaba familiarizado con el concepto de inercia y no se dio cuenta de que una vez que un cuerpo está en movimiento, no se necesita ninguna fuerza para mantenerlo en movimiento (si supones que no hay fricción). **41.** Galileo rebatió la noción de que un cuerpo en movimiento necesita una fuerza para mantenerlo en movimiento. Demostró que se necesitaba una fuerza para *cambiar* el movimiento, no para mantener a un cuerpo en movimiento, siempre y cuando la fricción fuera despreciable. **43.** Nada mantiene a los asteroides en movimiento. La fuerza del Sol desvía sus trayectorias pero no se necesita para mantenerlos en movimiento. **45.** Si jalas el mantel hacia abajo, incluso ligeramente, tenderá a levantar los platos, lo cual impedirá demostrar que los platos permanecen en reposo. Es mejor jalar el mantel en sentido horizontal para que los platos permanezcan en reposo. **47.** Tu cuerpo tiende a permanecer en reposo, en concordancia con la primera ley de Newton. La parte trasera del asiento te empuja hacia adelante. Sin soporte en la parte trasera de la cabeza, tu cabeza no es empujada hacia adelante junto con tu cuerpo, por lo que es probable que te lesiones el cuello. Por tanto, se recomiendan los reposacabezas. **49.** La ley de la inercia se aplica en ambos casos. Cuando el autobús frena, tiendes a seguir en movimiento con la rapidez anterior y te proyectas hacia adelante. Cuando el autobús adquiere rapidez, tiendes a seguir en movimiento con la rapidez anterior (más baja) y te proyectas hacia atrás. **51.** La suma vectorial de las fuerzas es igual a cero. Esto significa que la fuerza neta debe ser cero. **53.** Es correcto decir que los vectores son iguales en magnitud y opuestos en dirección. **55.** La tensión será mayor con un pandeo pequeño. Esto se debe a que se necesitan vectores grandes en cada lado de la soga que soporta al ave para que la resultante sea igual y opuesta al peso del ave. **57.** La fuerza ascendente es la tensión de la liana. La fuerza descendente es la debida a la gravedad. Ambas son iguales cuando el mono cuelga en equilibrio. **59.** No. Si sólo una fuerza distinta de cero actúa sobre un objeto, su movimiento cambiará y no estará en equilibrio mecánico. Tendría que haber otras fuerzas para que el resultado fuera una fuerza neta cero para el equilibrio. **61.** Sí. Si el disco se mueve en línea recta con rapidez invariable, las fuerzas de fricción son despreciables. Entonces la fuerza neta prácticamente es cero y el disco puede considerarse en equilibrio dinámico. **63.** La báscula registrará la mitad de su peso. De esta forma, la fuerza neta (jalón ascendente de la soga izquierda + jalón ascendente de la soga derecha – peso) = 0. **65.** El límite superior que él puede levantar es una carga igual a su peso. ¡Más allá de eso deja el suelo! **67.** La fuerza que evita la aceleración descendente es la fuerza de sostén (normal): la tabla empuja hacia arriba sobre el libro. **69.** Si la fuerza ascendente fuese la única fuerza que actúa, el libro de hecho se elevaría. Pero otra fuerza, la de la gravedad, hace que el resultado de la fuerza neta sea cero. **71.** Sólo cuando estás en equilibrio la fuerza de sostén sobre ti muestra correctamente tu peso. Entonces es igual a la fuerza de gravedad sobre ti. **73.** La fricción sobre la caja tiene que ser de 200 N, opuesta a tu jalón de 200 N. **75.** La fuerza de sostén sobre la caja disminuye a medida que la carga contra el suelo disminuye. Cuando la caja está levantada completamente del suelo, la fuerza de sostén del suelo es cero. La fuerza de sostén sobre los pies de los trabajadores aumenta proporcionalmente a medida que la carga se transfiere del suelo a ellos. Cuando la caja está fuera del suelo y en reposo, su peso se transfiere a los hombres, cuya fuerza normal aumenta en consecuencia. **77.** Dos fuerzas deben ser iguales y opuestas para que la fuerza neta = 0. Entonces el paracaidista está en equilibrio dinámico.

**Piensa y discute**

**79.** Tu amigo debe aprender que la inercia no es una clase de fuerza que mantiene en movimiento a cosas como la Tierra; es el nombre dado a la propiedad de las cosas de seguir haciendo lo que están haciendo en ausencia de una fuerza. De modo que tu amigo debe decir que no se necesita *nada* para mantener a la Tierra en movimiento. Es interesante que el Sol impida que la Tierra siga la trayectoria en línea recta que seguiría si no actuaran fuerzas, pero no la mantenga en movimiento. Nada lo hace. Éste es el concepto de inercia. **81.** La tendencia de la bola es permanecer en reposo. Desde un punto de vista fuera del vagón, la bola permanece en su lugar conforme la parte trasera del vagón se mueve hacia ella. (Debido a la fricción, la bola puede rodar por la superficie del vagón; sin fricción la superficie se deslizaría bajo la bola.) **83.** No. Si no hubiera una fricción que actuara sobre el carro, seguiría en movimiento cuando dejaras de empujar. Pero la fricción actúa, y el carro frena. Esto no viola la ley de la inercia porque de hecho actúa una fuerza externa. **85.** No. Si no hubiera una fuerza que actuara sobre la bola, ésta continuaría en movimiento sin frenar. Pero la resistencia del aire actúa, junto con una ligera fricción con la bolera, y la bola frena. Esto no viola la ley de la inercia porque, de hecho, sí hay fuerzas externas que actúan. **87.** No. La fuerza normal sería la misma ya sea que el libro esté sobre hielo resbaladizo o sobre papel de lija. La fricción no tiene ninguna función a menos que el libro se deslice o tienda a deslizarse por la superficie de la mesa. **89.** Un cuerpo en movimiento tiende a permanecer en movimiento, de modo que tú te mueves con la Tierra en movimiento ya sea que tus pies estén o no en contacto con ella. Cuando saltas, tu movimiento horizontal coincide con el de la Tierra y tú viajas con ella. Por tanto, la pared no choca contigo. **91.** Si el tren da vuelta a una esquina mientras la moneda está en el aire, aterrizará al lado tuyo. La moneda continúa en su movimiento horizontal, en concordancia con la ley de la inercia.

## Capítulo 3

**Preguntas conceptuales**

**1.** Con respecto a la silla, tu rapidez es cero. Con respecto al Sol, es 30 km/s. **3.** Un velocímetro registra la rapidez instantánea. **5.** El caballo recorre 25 km/h $\times$ 0.5 h = 12.5 km. **7.** Sí. Un automóvil que se mueve con velocidad constante se mueve con rapidez constante. **9.** La aceleración es 10 km/h/s. **11.** Tú estás consciente de los cambios en tu rapidez, mas no del movimiento estable. Por tanto, estás consciente de la aceleración, mas no de la velocidad constante. **13.** Galileo descubrió que la bola ganaba la misma cantidad de rapidez cada segundo, lo que indica que la aceleración es constante. **15.** Un objeto en caída libre es aquel sobre el cual la única fuerza que actúa es la fuerza de la gravedad. Esto significa caer sin ninguna resistencia del aire. **17.** La rapidez adquirida en 5 segundos es 50 m/s; en 6 segundos, 60 m/s. **19.** El objeto en movimiento pierde 10 m/s por cada segundo que se mueve hacia arriba. **21.** La distancia de caída en 1 s es 5 m. Para una caída de 4 s, la distancia de caída es 80 m. **23.** 10 m/s es la rapidez, 10 m es la distancia y 10 m/s$^2$ es la aceleración.

**Piensa y realiza**

**25.** Cuéntale a la abuela que, en efecto, la velocidad es qué tan rápido viajas y la aceleración es qué tan pronto cambia la rapidez. Por favor, ¡no le digas a la abuela que la velocidad es rapidez! **27.** Esto es un seguimiento de la actividad anterior, ¡una muy buena!

**Sustituye y listo**

**29.** Rapidez promedio $= \dfrac{\text{distancia recorrida}}{\text{tiempo}} = \dfrac{d}{t} = \dfrac{30\text{ m}}{2\text{ s}} = 15\text{ m/s}.$

**31.** Aceleración $= \dfrac{\text{cambio de velocidad}}{\text{tiempo}} = \dfrac{v}{t} = \dfrac{100\text{ k/m}}{10\text{ s}} = 10\text{ km/h} \cdot \text{s}$

**33.** Desde el reposo, distancia $= \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}(5\text{ m/s}^2)(3\text{ s})^2 = 22.5\text{ m}.$

**Piensa y resuelve**

**35.** Debido a que empieza ascendiendo a 30 m/s y pierde 10 m/s cada segundo, su tiempo de subida es de 3 segundos. Su tiempo de regreso también es de 3 segundos, de modo que está en el aire durante un total de 6 segundos. La distancia hacia arriba (o hacia abajo) es $\frac{1}{2}\,gt^2 = 5 \times 3^2 = 45$ m. O, a partir de $d = vt$, donde velocidad promedio es $(30 + 0)/2 = 15$ m/s, y el tiempo es de 3 segundos, también se obtiene $d = 15\text{ m/s} \times 3\text{ s} = 45\text{ m}$. **37.** Con $g = 10\text{ m/s}^2$, se ve que

$$v = gt = (10\text{ m/s}^2)(10\text{ s}) = 100\text{ m/s};\ v_{\text{prom}} = \frac{\left(v_{\text{inicial}} + v_{\text{final}}\right)}{2} = \frac{(0+100)}{2} = 50\text{ m/s},$$

hacia abajo. Se puede obtener "cuán lejos" a partir de $d = v_{\text{prom}}t = (50\text{ m/s})(10\text{ s}) = 500$ m o, de manera equivalente, $d = \frac{1}{2}gt^2 = 5(10)^2 = 500$ m. (La física es amigable… ¡se obtiene la misma distancia usando cualquier fórmula!) **39.** A partir de $d = \frac{1}{2}gt^2 = 5t^2$, $t = \sqrt{d/5} = \sqrt{(0.6)/5} = 0.35$ s. Al duplicar para un "tiempo de vuelo" produce 0.7 s.

**Piensa y clasifica**

**41.** D, C, A, B **43.** (a) B, A = C; (b) A, B, C; (c) C, B, A **45.** B, A, C

### Piensa y explica

**47.** Mientras más corto, mejor, de modo que Mo tiene el tiempo de reacción más favorable y puede responder más rápido que Jon a las situaciones. **49.** La rapidez de impacto es la rapidez relativa: 2 km/h (100 km/h – 98 km/h = 2 km/h). **51.** Tu multa por exceso de velocidad se basa en tu rapidez instantánea: la rapidez registrada en un velocímetro o un radar. **53.** Velocidad constante significa no aceleración, de modo que la aceleración de la luz es cero. **55.** (a) Sí, debido al cambio de dirección. (b) Sí, debido al cambio de velocidad. **57.** No. No puedes decir cuál automóvil experimenta mayor aceleración a menos que conozcas los tiempos implicados. **59.** El mayor cambio en rapidez ocurre para (30 km/h – 25 km/h = 5 km/h), que es mayor que (100 km/h – 96 km/h = 4 km/h). De modo que, para el mismo tiempo, el más lento tiene mayor aceleración. **61.** La lectura de su rapidez aumentaría 10 m/s cada segundo. **63.** La aceleración de caída libre al final del 5º, 10º o cualquier número de segundos es $g$. Su *velocidad* tiene diferentes valores en diferentes tiempos, pero, dado que está libre de los efectos de la resistencia del aire, su *aceleración* permanece constante en $g$. **65.** Ya sea hacia arriba o hacia abajo, la tasa de cambio de la rapidez con respecto al tiempo es 10 m/s$^2$, de modo que a cada segundo que sube la rapidez disminuye en 10 m/s. Al bajar, la rapidez aumenta en 10 m/s a cada segundo. De este modo, sin resistencia del aire, el tiempo para subir es igual al tiempo para bajar. **67.** Cuando la resistencia del aire afecta el movimiento, la bola lanzada hacia arriba regresa a su nivel de partida con menos rapidez que su rapidez inicial, y también menos rapidez que la bola lanzada hacia abajo. De modo que la bola lanzada hacia abajo golpea el suelo con mayor rapidez. **69.** La aceleración debida a la gravedad permanece en $g$ constante en todos los puntos a lo largo de su trayectoria en tanto otras fuerzas como la resistencia del aire no actúen sobre el proyectil. **71.** Si no fuera por el efecto de frenado del aire, ¡las gotas de lluvia golpearían el suelo con la rapidez de balas veloces! **73.** La resistencia del aire disminuye la rapidez. De modo que una bola lanzada regresará con menos rapidez de la que poseía en un inicio. **75.** Conforme el agua cae, adquiere rapidez. Dado que la misma cantidad de agua sale del grifo cada segundo, se estira conforme la distancia aumenta. Se vuelve más delgada como el caramelo se vuelve más delgado mientras más se estira. Cuando el agua se estira demasiado, se rompe en forma de gotas. **77.** Respuesta abierta.

### Piensa y discute

**79.** Sí. La velocidad y la aceleración no necesitan estar en la misma dirección. Un automóvil que se mueve hacia el norte y frena, por ejemplo, acelera hacia el sur. **81.** La aceleración ocurre cuando cambia la lectura del velocímetro. Si no hay cambio, no hay aceleración. **83.** Cualquier objeto que se mueve en un círculo o a lo largo de una curva cambia de velocidad (acelera), incluso si su rapidez es constante, porque su dirección cambia. Algo con velocidad constante tiene *tanto* dirección constante *como* rapidez constante, de modo que no hay ningún ejemplo de movimiento con velocidad constante y rapidez variable. **85.** Un objeto que se mueve en una trayectoria circular con rapidez constante es un ejemplo simple de aceleración con rapidez constante porque su velocidad cambia de dirección. No puede darse ningún ejemplo del segundo caso porque velocidad constante significa aceleración cero. No puedes tener aceleración distinta de cero mientras tienes velocidad constante. No hay ningún ejemplo de cosas que aceleren mientras no aceleran. **87.** La aceleración de un objeto está en una dirección opuesta a su velocidad cuando su velocidad disminuye, por ejemplo, una bola que sube o un automóvil que frena hasta detenerse. **89.** La que está en medio. Dicha bola gana rapidez más rápido al principio, donde la pendiente es más pronunciada, de modo que su rapidez promedio es mayor aun cuando tenga menos aceleración en la última parte de su viaje. **91.** Si la resistencia del aire no es un factor, la aceleración de un objeto son los mismos 10 m/s$^2$ sin importar su velocidad inicial. Si se lanza hacia abajo, su velocidad será mayor, pero no su aceleración. **93.** Cuando la aceleración del automóvil está en una dirección opuesta a su velocidad, el automóvil "desacelera", frena. **95.** La bola en B termina primero porque su rapidez promedio a lo largo de la parte inferior, así como las pendientes hacia abajo y hacia arriba, es mayor que la rapidez promedio de la bola a lo largo de la pista A. **97.** La rapidez resultante de hecho es de 5 m/s. La resultante de cualquier par de vectores de 3 y 4 unidades en ángulo recto mutuo es de 5 unidades. Esto se confirma con el teorema de Pitágoras: $a^2 + b^2 = c^2$ produce $3^2 + 4^2 = 5^2$. **99.** De nuevo, de acuerdo con el teorema de Pitágoras, $a^2 + b^2 = c^2$ produce $120^2 + 90^2 = 150^2$. De modo que la rapidez en tierra es de 150 km/h.

## Capítulo 4

### Preguntas conceptuales

**1.** La aceleración y la fuerza neta son proporcionales entre sí, no iguales. **3.** Sí. A medida que aumentas tu empuje, la fricción también aumenta en la misma proporción. **5.** La fricción estática es mayor que la resistencia al deslizamiento para el mismo objeto. **7.** Sí. La fricción de los fluidos varía con la rapidez. **9.** masa; peso. **11.** Una hamburguesa de un cuarto de libra después de cocerse pesa alrededor de 1 newton. **13.** La cuerda superior se rompe principalmente por el peso de la bola. **15.** La aceleración es inversamente proporcional a la masa. **17.** No. El peso es proporcional a la masa, pero no *igual* a la masa. **19.** La aceleración disminuye a un tercio. **21.** La aceleración y la fuerza neta están en la misma dirección. **23.** La razón de la fuerza con respecto a la masa es $g$. **25.** La fuerza neta es 10 N. **27.** La rapidez y el área frontal afectan la fuerza de la resistencia del aire. **29.** Un paracaidista más pesado tiene que caer más rápido para que la resistencia del aire equilibre el peso.

### Piensa y realiza

**31.** Relata cómo Newton siguió a Galileo, y así sucesivamente. **33.** Cuando el papel está encima del libro que cae, sobre el papel no actúa la resistencia del aire porque el libro lo blinda del aire. ¡De modo que papel y libro caen con la misma aceleración! **35.** ¡El carrete rodará hacia la derecha! Hay un ángulo en el cual no rodará sino se deslizará. Cualquier ángulo mayor hará que el carrete ruede hacia la izquierda. Pero, jalado en sentido horizontal, rueda en la dirección del jalón.

### Sustituye y listo

**37.** Peso = (2,000 kg)(10 N/kg) = 20,000 N. **39.** (1 N)(1 kg/10 N) = 0.1 kg; (0.1 kg)(2.2 lb/1 kg) = 0.22 lb. **41.** $a = F_{neta}/m = \dfrac{(500\text{ N})}{(2{,}000\text{ kg})} = \dfrac{0.25\text{ N}}{\text{kg}}$ = 0.25 m/s$^2$. **43.** $a = F_{neta}/m = \dfrac{200\text{ N}}{40\text{ kg}} = 5\text{ m/s}^2$.

**45.** $a = \dfrac{F_{neta}}{m} = \dfrac{15\text{ N}}{3.0\text{ kg}} = \dfrac{5.0\text{ N}}{\text{kg}} = 5.0\text{ m/s}^2$.

**47.** $F_{neta} = ma$ = (12 kg)(7.0 m/s$^2$) = 84 kg·m/s$^2$ = 84 N.

### Piensa y resuelve

**49.** La masa de Lillian es (500 N)/(10 N/kg) = 50 kg. Su peso en libras es (50 kg)(2.2 lb/kg) = 110 lb. **51.** Para el jet, $a = F/m$ = 2(30,000 N)/30,000 kg = 2 m/s$^2$. **53.** (a) La fuerza sobre el autobús es $Ma$. Nueva aceleración = misma fuerza/nueva masa = $Ma/(M + M/5) = 5Ma/(5M + M) = 5Ma/6M = (5/6)a$. (b) Nueva aceleración = $(5/6)a$ = (5/6)(1.2 m/s$^2$) = 1.0 m/s$^2$.

### Piensa y clasifica

**55.** C, B, A **57.** (a) C, A, B; (b) B, A, C

### Piensa y explica

**59.** Sí. Si la bola frena, actúa una fuerza opuesta a su movimiento, probablemente el arrastre aerodinámico y la fricción entre la bola y la bolera. **61.** No. La inercia tiene que ver con la masa, no con el peso. **63.** Compra por peso en Denver, porque la aceleración de la gravedad es menor en Denver que en Death Valley. Comprar por masa sería lo mismo en ambas ubicaciones. **65.** Cuando transportas una carga pesada, hay más masa implicada y una mayor tendencia a permanecer en movimiento. Si una carga en tu mano se mueve hacia una pared, su tendencia es permanecer en movimiento cuando haga contacto. Esto tiende a apachurrar tu mano si está entre la carga y la pared, un ejemplo desafortunado de la primera ley de Newton en acción. **67.** Un cuchillo de carnicero masivo es más efectivo porque su masa más grande contribuye a una mayor tendencia a seguir en movimiento conforme el cuchillo corta el alimento. **69.** Diez kilogramos pesan unos 100 N en la Tierra (peso = $mg$ = 10 kg × 10 m/s$^2$ = 100 N, o 98 N si se usa $g$ = 9.8 m/s$^2$). En la Luna el peso es 1/6 de 100 N = 16.7 N (o 16 N si se usa $g$ = 9.8 m/s$^2$). La masa es 10 kg en todas partes. **71.** El cambio de peso es el cambio de masa por $g$, de modo que, cuando cambia la masa por 2 kg, el peso cambia en alrededor de 20 N. **73.** 1 kg de masa pesa 10 N, de modo que 30 kg pesan 300 N. La bolsa puede contener con seguridad 30 kg de manzanas, si no la levantas muy rápido. **75.** La segunda ley enuncia la relación entre fuerza y aceleración. Si no hay fuerza neta, no hay aceleración, que es lo que la primera ley de Newton señala. De modo que la primera ley de Newton es congruente con la segunda ley y puede considerarse un caso especial de la segunda ley. **77.** De acuerdo. La aceleración (frenar el automóvil) es opuesta a la velocidad (la dirección en que se mueve el automóvil). **79.** Levantar al oponente disminuye la fuerza con la cual el suelo lo soporta a él y, en correspondencia, disminuye la fuerza de fricción que puede reunir. La fricción reducida limita la efectividad del oponente. **81.** (a) No. La resistencia del aire también actúa. Caída libre significa libre de todas las fuerzas distintas de la de la gravedad. Un objeto que cae puede experimentar resistencia del aire; un objeto en caída libre sólo experimenta la fuerza debida a la gravedad. (b) Sí. Aunque no se acerca más a la Tierra, el satélite está cayendo (más sobre esto en el Capítulo 10). **83.** La única fuerza sobre una moneda lanzada, excepto por la resistencia del aire, es $mg$. De modo que el mismo $mg$ actúa sobre ella en todos los puntos de su trayectoria. **85.** Explicas la diferencia entre una fuerza aplicada y una fuerza neta. Sería correcto decir que sobre un

automóvil en reposo no actúa ninguna fuerza *neta*. **87.** Cuando la manzana se sostiene en reposo, la fuerza de sostén ascendente es igual a la fuerza gravitacional sobre la manzana y la fuerza neta es cero. Cuando la manzana se suelta, la fuerza de sostén ascendente ya no está ahí y la fuerza neta es la fuerza gravitacional, 1 N. (Si la manzana cae suficientemente rápido como para que la resistencia del aire sea importante, entonces la fuerza neta será menos que 1 N y con el tiempo puede llegar a cero si la resistencia del aire se acumula hasta 1 N.) **89.** Ambas fuerzas tienen la misma magnitud. Esto es más fácil de entender si visualizas al paracaidista en reposo en una fuerte corriente ascendente de aire: equilibrio estático. Ya sea equilibrio estático o dinámico, la fuerza neta es cero. **91.** Cuando una paracaidista abre su paracaídas, ella frena. Esto significa que acelera hacia arriba. **93.** Justo antes de que un cuerpo en caída alcance una velocidad terminal, todavía hay una aceleración descendente, porque la fuerza gravitacional todavía es mayor que la resistencia del aire. Cuando la resistencia del aire se acumula para igualar la fuerza gravitacional, se alcanza una velocidad terminal. Entonces la resistencia del aire es igual y opuesta a la fuerza gravitacional. **95.** La esfera estará en equilibrio cuando alcance rapidez terminal, lo que ocurre cuando la fuerza gravitacional sobre ella se equilibra con una fuerza igual y opuesta de arrastre del fluido. **97.** La pelota de tenis más pesada golpeará el suelo primero por la misma razón que el paracaidista más pesado de la Figura 4.15 golpea el suelo primero. Observa que, aunque la resistencia del aire sobre la pelota más pesada es más pequeña con relación al peso de la pelota, en realidad es más grande que la resistencia del aire que actúa sobre la otra pelota. ¿Por qué? Porque la pelota más pesada cae más rápido y la resistencia del aire es más grande a mayor rapidez. **99.** La bola sube en menos tiempo del que cae. Si exageras la circunstancia y consideras el ejemplo de la pluma del ejercicio 98, el tiempo para que la pluma ondee desde su máxima altitud evidentemente es más largo que el tiempo que tarda en alcanzar dicha altitud. Lo mismo sucede en el caso no tan evidente de la bola.

### Piensa y discute

**101.** Sí, como lo ilustra una bola lanzada al aire en sentido vertical. En un inicio su velocidad es hacia arriba y al final es hacia abajo, todo ello mientras acelera con una $g$ constante descendente. **103.** No. Un objeto puede moverse en una curva sólo cuando actúa una fuerza. Sin fuerza, su trayectoria sería una línea recta. **105.** Una persona a dieta busca perder masa. Es interesante que una persona pueda perder peso con sólo alejarse más del centro de la Tierra, en la cima de una montaña, por ejemplo. **107.** Observa que 30 N jalan tres bloques. Para jalar dos bloques, entonces se necesita un jalón de 20 N, que es la tensión de la soga entre el segundo y el tercer bloque. En consecuencia, la tensión de la soga que jala sólo al tercer bloque es 10 N. (Observa que la fuerza neta sobre el primer bloque, 30 N – 20 N = 10 N, es la fuerza necesaria para acelerar dicho bloque, que tiene un tercio de la masa total.) **109.** Cuando te detienes en forma súbita, tu velocidad cambia rápidamente, lo cual significa una gran aceleración de detención. Por la segunda ley de Newton, esto significa que la fuerza que actúa sobre ti también es grande. Experimentar una gran fuerza es lo que te lesiona. **111.** La fuerza que ejerces sobre el suelo es mayor. El suelo debe empujar sobre ti con una fuerza mayor que la fuerza descendente de la gravedad para producir una fuerza neta resultante que sea ascendente y que te acelere hacia arriba. **113.** En el caso de una aceleración decreciente, el aumento de rapidez se vuelve más pequeño cada segundo, no obstante, en cada segundo hay una mayor rapidez que en el segundo precedente. **115.** La fuerza neta es 10 N – 2 N = 8 N (o, más precisamente, 9.8 N – 2 N = 7.8 N). **117.** Una hoja de papel presenta un área superficial más grande al aire mientras cae (a menos que caiga de canto) y, por tanto, tiene menor rapidez terminal. Una hoja de papel arrugado presenta un área más pequeña y, en consecuencia, cae más rápido antes de alcanzar su rapidez terminal. **119.** Para rapideces bajas, las aceleraciones son casi iguales porque el arrastre aerodinámico es pequeño con relación a los pesos de los objetos que caen. Desde una mayor altura, hay tiempo para que el arrastre aerodinámico se acumule y muestre sus efectos de manera más notoria. **121.** En ninguna parte su velocidad es hacia arriba. La fuerza neta ascendente sobre Nellie durante el corto tiempo que el arrastre aerodinámico supera la fuerza de gravedad produce una momentánea fuerza neta ascendente y aceleración ascendente. Esto produce una *disminución* en su rapidez descendente que, no obstante, todavía es descendente.

## Capítulo 5

### Preguntas conceptuales

**1.** La fuerza es la de la pared que empuja sobre tus dedos. **3.** Para una interacción se necesita un par de fuerzas. **5.** Acción: bate contra pelota. Reacción: bola contra bate. **7.** No. El par de fuerzas es interno al sistema manzana-naranja. **9.** Sí. La fuerza neta la proporciona el contacto con tu pie. Si dos fuerzas opuestas e iguales actúan sobre el balón, la fuerza neta sobre él es cero y no acelerará. **11.** Las diferentes aceleraciones se deben a distintas masas. **13.** Un helicóptero consigue su fuerza de sustentación al empujar el aire hacia abajo, en cuyo caso la reacción es el aire que empuja al helicóptero hacia arriba. **15.** El proceso para determinar los componentes de un vector. **17.** La fuerza de fricción tiene la misma magnitud, y la suma de todas las fuerzas es cero. **19.** inercia; aceleración; acción; reacción.

### Piensa y realiza

**21.** Tu mano será empujada hacia arriba, una reacción del aire que se desvía hacia abajo.

### Sustituye y listo

**23.** 100 km/h − 75 km/h = 25 km/h hacia el norte. 100 km/h + 75 km/h = 175 km/h hacia el norte. **25.** $R = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5$.

### Piensa y resuelve

**27.** (a) $a = \Delta v/\Delta t = (25\,\text{m/s})/(0.05\,\text{s}) = 500\,\text{m/s}^2$. (b) $F = ma = (0.003\,\text{kg})(500\,\text{m/s}^2)$ = 1.5 N, que es aproximadamente ⅓ de libra. (c) Por la tercera ley de Newton, la misma cantidad, 1.5 N. **29.** $a = F/m$, donde $F = \sqrt{(3.0\text{ N})^2 + (4.0\text{ N})^2} = 5$ N. De modo que $a = F/m = 5\text{ N}/2.0\text{ kg} = 2.5\,\text{m/s}^2$.

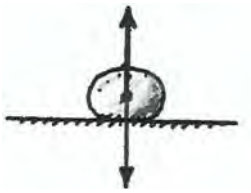
### Piensa y clasifica

**31.** A = B = C **33.** (a) A = B = C; (b) C, B, A

### Piensa y explica

**35.** En concordancia con la tercera ley de Newton, Steve y Gretchen se tocan mutuamente. Uno de ellos puede iniciar el contacto, pero la interacción física no puede ocurrir sin contacto entre Steve y Gretchen. De hecho, ¡no puedes tocar sin ser tocado! **37.** (a) Actúan dos pares de fuerzas: el jalón de la Tierra sobre la manzana (acción) y el jalón de la manzana sobre la Tierra (reacción); y la mano empuja la manzana hacia arriba (acción) y la manzana empuja la mano hacia abajo (reacción). (b) Sin arrastre aerodinámico, actúa un par de fuerzas: el jalón de la Tierra sobre la manzana y el jalón de la manzana sobre la Tierra. **39.** (a) Mientras el bate está en contacto con la bola hay dos interacciones, una con el bate e, incluso entonces, con la gravedad de la Tierra. Acción: el bate golpea a la bola; reacción: la bola golpea al bate. Y, acción: la Tierra jala hacia abajo sobre la bola (peso); reacción: la bola jala hacia arriba sobre la Tierra. (b) Mientras la bola está en vuelo, las principales interacciones son con la gravedad de la Tierra y con el aire. Acción: la Tierra jala hacia abajo sobre la bola (peso); reacción: la bola jala hacia arriba sobre la Tierra. Y, acción: el aire empuja a la bola; reacción: la bola empuja al aire. **41.** Cuando la bola ejerce una fuerza sobre el suelo, el suelo ejerce una fuerza igual y opuesta sobre la bola, por lo tanto rebota. La fuerza del suelo sobre la bola proporciona el rebote. **43.** La fricción sobre la caja es de 200 N, los cuales cancelan tu empuje de 200 N sobre la caja para producir la fuerza neta cero que explica la velocidad constante (aceleración cero). No, aunque la fuerza de fricción sea igual y con dirección opuesta a la fuerza aplicada, las dos *no* constituyen un par de fuerzas acción-reacción. Eso se debe a que ambas fuerzas actúan sobre *el mismo* objeto: la caja. La reacción a tu empuje sobre la caja es el empuje de la caja de vuelta sobre ti. La reacción a la fuerza de fricción del suelo sobre la caja es la fuerza de fricción opuesta de la caja sobre el suelo. **45.** Las fuerzas deben ser iguales y opuestas porque son las únicas fuerzas que actúan sobre la persona, quien obviamente no acelera. Sin embargo, observa que el par de fuerzas *no* constituyen un par acción-reacción porque actúan sobre *el mismo* cuerpo. La fuerza descendente, el peso del hombre, *la Tierra jala hacia abajo sobre el hombre*, tiene la reacción *el hombre jala hacia arriba a la Tierra*, no el suelo empuja sobre él. Y la fuerza ascendente del suelo sobre el hombre tiene la reacción del hombre contra el suelo, no la interacción entre el hombre y la Tierra. (Si esto te parece confuso, puedes encontrar consuelo en el hecho de que el mismo Newton tenía problemas para aplicar su tercera ley a ciertas situaciones. Aplica la regla, *A* sobre *B* reacciona a *B* sobre *A*, como en la Figura 5.7.) **47.** Cuando el escalador jala la soga hacia abajo, la soga jala simultáneamente al escalador hacia arriba, en la dirección que desea el escalador. **49.** No. El hombre fuerte puede ejercer sólo fuerzas iguales sobre ambos vagones, tal como tu empuje contra una pared iguala al empuje de la pared sobre ti. Lo mismo sucede con dos paredes o dos vagones. Dado que sus masas son iguales, experimentarán aceleraciones iguales y se moverán igualmente. **51.** En concordancia con la tercera ley de Newton, la fuerza sobre cada uno es de la misma magnitud. Pero el efecto de la fuerza (la aceleración) es diferente para cada uno debido a las distintas masas. El más masivo camión Mack experimenta menos cambio de movimiento que el Civic. **53.** El equipo ganador empuja más fuerte contra el suelo. Entonces el suelo empuja más fuerte sobre ellos, lo que produce una fuerza neta a su favor. **55.** No. La fuerza sobre la soga es cero, lo cual significa que la tensión es la misma en ambos extremos, en concordancia con la tercera ley de Newton. **57.** Parece que el escritor no sabía que la reacción a los gases de escape no depende de un medio para los

gases. Una pistola, por ejemplo, retrocederá si se dispara en un vacío. De hecho, en un vacío no hay arrastre aerodinámico y una bala o cohete funcionan incluso mejor. **59.** Ascender significa jalar el cable hacia abajo, lo que mueve el globo hacia abajo conforme la persona asciende. **61.** (a) El otro vector es hacia arriba, como se muestra. (b) Se llama fuerza normal.



**63.** (a) Vectores como se muestran. (b) La fuerza de tensión ascendente es mayor, lo que resulta en una fuerza neta ascendente.

**65.** La aceleración de la piedra en lo alto de su trayectoria, o en cualquier parte donde la fuerza neta sobre la piedra sea $mg$, es $g$, hacia abajo. **67.** (a) Las fuerzas vectoriales como se muestran. (b) Observa que la resultante de las dos fuerzas normales es igual y opuesta al peso de la piedra.

**69.** Las magnitudes de $mg$ y $S$ serán iguales. **71.** Ninguna fuerza actúa en sentido horizontal sobre la bola, de modo que la velocidad horizontal inicial permanece constante conforme la bola se mueve a través del aire en concordancia con la primera ley de inercia de Newton.

### Piensa y discute

**73.** La respuesta está dada en la ecuación $a = F/m$. Conforme el combustible se quema, la masa del cohete se vuelve menor. Conforme $m$ disminuye mientras $F$ permanece igual, ¡$a$ aumenta! A medida que el combustible se quema hay menos masa que acelerar. **75.** Sí, es cierto. La Tierra no puede jalarte hacia abajo sin que tú simultáneamente jales a la Tierra hacia arriba. La aceleración de la Tierra es despreciablemente pequeña y no se percibe debido a la enorme masa de la Tierra. **77.** Sí. Una pelota de béisbol ejerce una fuerza externa sobre el bate, opuesta al movimiento del mismo. Esta fuerza externa desacelera el bate que viene en dirección contraria. **79.** Las fuerzas no se cancelan porque actúan sobre diferentes cosas: una actúa sobre el caballo y la otra actúa sobre el vagón. Es cierto que el vagón jala de vuelta sobre el caballo y que esto impide que el caballo corra tan rápido como podría hacerlo sin el vagón enganchado. Pero la fuerza que actúa sobre el vagón (el jalón del caballo menos la fricción) dividida entre la masa del vagón produce la aceleración del vagón. Para acelerar, el caballo tiene que empujar contra el suelo con más fuerza de la que ejerce sobre el vagón y el vagón ejerce sobre él. Así que debes decirle al caballo que empuje hacia atrás sobre el suelo.

## Capítulo 6

### Preguntas conceptuales

**1.** La patineta en movimiento tiene mayor cantidad de movimiento sólo porque se está moviendo. **3.** El impulso puede aumentar al incrementarse la fuerza o al aumentar el tiempo de aplicación. **5.** La relación entre el impulso y la cantidad de movimiento se deriva de la segunda ley de Newton. **7.** Menos fuerza ocurre si la cantidad de movimiento disminuye durante un largo tiempo. **9.** Si ruedas con el golpe, el impacto tiene lugar durante un tiempo largo, lo cual significa un golpe con menos fuerza. **11.** La opción (c) necesita el impulso más grande. **13.** Sí; el enunciado es correcto. **15.** La cantidad de movimiento no se conservaría si la fuerza, y por tanto el impulso, no fuera una cantidad vectorial. **17.** El vagón B tiene la rapidez del vagón A antes de la colisión. **19.** Dado que son vectores con la misma magnitud en ángulos rectos entre sí, la cantidad de movimiento combinada es $\sqrt{2}$ kg · m/s.

### Piensa y realiza

**21.** Respuesta abierta.

### Sustituye y listo

**23.** $p = mv = (50\text{ kg})(4\text{ m/s}) = 200\text{ kg·m/s}$. **25.** $I = (10\text{ N})(5\text{ s}) = 50\text{ N·s}$. **27.** $I = \Delta mv = (50\text{ kg})(4\text{ m/s}) = 200\text{ kg·m/s} = 200\text{ N·s}$.

### Piensa y resuelve

**29.** La bola de boliche tiene una cantidad de movimiento de $(10\text{ kg})(6\text{ m/s}) = 60\text{ kg·m/s}$, que tiene la magnitud del impulso para detenerla. Esto es 60 N·s. (Observa las unidades $\text{N·s} = \text{kg·m/s}$.) **31.** A partir de $Ft = \Delta mv$, $Ft = \dfrac{\Delta mv}{t} = [(75\text{ kg})(25\text{ m/s})]/0.1\text{ s} = 18{,}750\text{ N}$. **33.** La cantidad de movimiento después de la colisión es cero, lo cual significa que la cantidad de movimiento antes de la colisión debió ser cero. La bola de 1 kg debe moverse el doble de rápido que la bola de 2 kg de modo que las magnitudes de sus cantidades de movimiento sean iguales.

**35.** $\text{Cantidad de movimiento}_{\text{antes}} = \text{cantidad de movimiento}_{\text{después}}$

$$(5\text{ kg})(1\text{ m/s}) + (1\text{ kg})v = 0$$
$$5\text{ m/s} + v = 0$$
$$v = -5\text{ m/s}$$

De modo que, si el pez pequeño se aproxima al pez grande a 5 m/s, la cantidad de movimiento después del almuerzo es cero.

**37.** En ambos casos puede aplicarse la conservación de la cantidad de movimiento. (a) Para el movimiento frontal, la cantidad de movimiento total es cero, de modo que los restos después de la colisión no tienen movimiento. (b) Como se muestra en la Figura 6.18, la cantidad de movimiento total se dirige hacia el noreste, la resultante de dos vectores perpendiculares, cada uno con una magnitud de 20,000 kg·m/s. Tiene una magnitud de 28,200 kg·m/s. La rapidez de los restos es esta cantidad de movimiento dividida entre la masa total, $v = (28{,}200\text{ kg·m/s})/(2{,}000\text{ kg}) = 14\text{ m/s}$.

### Piensa y clasifica

**39.** (a) B, D, C, A; (b) B, D, C, A **41.** (a) A, B, C; (b) A, B, C; (c) C, B, A; (d) A, B, C

### Piensa y explica

**43.** La cantidad de movimiento de un supertanque es enorme, lo cual significa que se necesitan impulsos enormes para cambiar su movimiento, que se producen al aplicar fuerzas modestas durante largos periodos. Debido a la fuerza de la resistencia del agua, el supertanque debe desplazarse 25 km para reducir suficientemente la cantidad de movimiento. **45.** Las bolsas de aire prolongan el tiempo de impacto, lo que en consecuencia reduce la fuerza de impacto. **47.** Las sogas que se estiran prolongan el tiempo durante el cual disminuye la cantidad de movimiento, lo que en consecuencia reduce la fuerza de sacudida de la soga. Observa que detener a una persona más suavemente *no* reduce el impulso; reduce sólo la fuerza. **49.** Doblar las rodillas te da más tiempo para que disminuya la cantidad de movimiento, lo que en consecuencia reduce la fuerza de aterrizaje. **51.** Una mano extendida te da más tiempo para que disminuya la cantidad de movimiento de la bola hasta cero, lo que resulta en una menor fuerza de impacto sobre tu mano. **53.** El arrugamiento da más tiempo para que disminuya la cantidad de movimiento del automóvil, lo que resulta en una menor fuerza de impacto sobre los ocupantes. **55.** Su cantidad de movimiento es la misma (su peso puede cambiar, mas no su masa). **57.** La gran cantidad de movimiento del agua que brota produce un retroceso que hace que la manguera sea difícil de sostener, tal como una escopeta es difícil de sostener cuando dispara perdigones. **59.** Impulso es fuerza × tiempo. Las fuerzas son iguales y opuestas, por la tercera ley de Newton, y los tiempos son iguales, de modo que los impulsos son iguales y opuestos. **61.** La cantidad de movimiento de la manzana que cae se transfiere hacia la Tierra. Es interesante que cuando la manzana se suelta, la Tierra y la manzana se mueven una hacia la otra con cantidades de movimiento iguales y opuestas. Debido a la enorme masa de la Tierra, su movimiento es imperceptible. Cuando la manzana y la Tierra se golpean entre sí, sus cantidades de movimiento llegan a cancelarse: cero, el mismo valor que antes. **63.** Los guantes más ligeros tienen menos acolchonamiento y menos capacidad para prolongar el tiempo de impacto. Por tanto, resultan en mayores fuerzas de impacto para un golpe dado. **65.** La nube de insectos voladores puede tener una cantidad de movimiento neta igual a cero si permanece en la misma posición; entonces las cantidades de movimiento de los innumerables insectos se cancelan y no hay una cantidad de movimiento neta en ninguna dirección dada. **67.** No. Si no se imparte ninguna cantidad

de movimiento a la bola, no se impartirá ninguna cantidad de movimiento con dirección opuesta sobre el lanzador. Realizar los movimientos de lanzamiento no tiene ningún efecto neto. Si al comienzo del lanzamiento comienzas a retroceder, al final del lanzamiento cuando detienes el movimiento de tu brazo y sostienes la bola, también dejas de moverte. Tu posición puede cambiar un poco, pero terminas en reposo. No darle una cantidad de movimiento a la bola significa que tú no ganas ninguna cantidad de movimiento de retroceso. **69.** Los dos carros que retroceden tienen la misma cantidad de movimiento. De modo que el carro con el doble de masa tiene la mitad de la rapidez que el carro menos masivo; esto es, $2m(v/2) = mv$. **71.** La cantidad de movimiento no se conserva para la bola en sí porque sobre ella se ejerce un impulso (fuerza gravitacional × tiempo), de modo que la bola gana cantidad de movimiento. Sólo en *ausencia* de una fuerza externa la cantidad de movimiento no cambia. Si toda la Tierra y la bola que rueda se toman en conjunto como un sistema, entonces la interacción gravitacional entre la Tierra y la bola son fuerzas internas y no actúa un impulso externo. Entonces el cambio en la cantidad de movimiento de la bola se acompaña de un cambio igual y opuesto de cantidad de movimiento de la Tierra, lo que resulta en un cambio nulo en la cantidad de movimiento. **73.** Para el sistema en el que está sólo la bola, la cantidad de movimiento cambia y, por tanto, no se conserva. Pero para el sistema más grande de bola + Tierra, la cantidad de movimiento se conserva porque los impulsos que actúan son impulsos internos. El cambio en la cantidad de movimiento de la bola es igual y opuesto al cambio en la cantidad de movimiento de la Tierra que retrocede. **75.** Si el sistema se compone de la piedra sola, su cantidad de movimiento indudablemente cambia cuando cae. Si el sistema se agranda e incluye la piedra + la Tierra, entonces la cantidad de movimiento descendente de la piedra se cancela con la cantidad de movimiento igual pero opuesta de la Tierra que "corre" para encontrar a la piedra. **77.** Por la tercera ley de Newton, la fuerza sobre el bicho es igual en magnitud y opuesta en dirección a la fuerza sobre el parabrisas del automóvil. El resto es lógica: dado que el tiempo de impacto es el mismo para ambos, la cantidad de impulso es la misma para ambos, lo cual significa que ambos experimentan el mismo cambio en cantidad de movimiento. El cambio en la cantidad de movimiento del bicho es evidente debido a su gran cambio en rapidez. El mismo cambio en la cantidad de movimiento del automóvil mucho más masivo no es evidente porque el cambio en rapidez es muy pequeño. No obstante, ¡la magnitud de $m\Delta V$ para el bicho es igual a $M\Delta v$ para el automóvil! **79.** La magnitud de fuerza, impulso y cambio en cantidad de movimiento es la misma para cada uno. El Mini Cooper experimenta una mayor desaceleración porque su masa es menor. **81.** La dirección de la cantidad de movimiento es hacia la izquierda porque la cantidad de movimiento del carro de 0.8 kg es mayor. Considerando la magnitud, la cantidad de movimiento neta = $(0.5)(1) - (0.8)(1.2) = -0.46$. **83.** Se viola la conservación de la cantidad de movimiento. La cantidad de movimiento del bote antes de que el héroe aterrice sobre él será la misma que la cantidad de movimiento de bote + héroe después. El bote frenará. Si, por ejemplo, las masas del héroe y el bote fuesen iguales, el bote debería frenarse a la mitad de la rapidez: $mv_{\text{antes}} = 2m(v/2)_{\text{después}}$. En términos de impulso-cantidad de movimiento, cuando el héroe hace contacto con el bote, se mueve junto con el bote por una fuerza de fricción entre sus pies y la superficie del bote. La fuerza de fricción igual y opuesta sobre la superficie del bote proporciona el impulso que frena el bote. (Aquí sólo se consideran fuerzas horizontales y el componente horizontal de la cantidad de movimiento.) **85.** El impulso será mayor si la mano rebota porque hay un cambio mayor en la cantidad de movimiento de la mano y el brazo, acompañados de un impulso más grande. La fuerza ejercida sobre los ladrillos es igual y opuesta a la fuerza de los ladrillos sobre la mano. Por fortuna, la mano es resistente y está endurecida por la práctica prolongada.

### Piensa y discute

**87.** Cuando un boxeador golpea a su oponente, el oponente contribuye al impulso que cambia la cantidad de movimiento del golpe. Cuando el golpe falla, el oponente no suministra impulso: todo el esfuerzo se va en reducir la cantidad de movimiento de los golpes que suministra el boxeador en sí. Esto cansa al boxeador. **89.** La fuerza interna de los frenos lleva la rueda al reposo. Pero las ruedas, después de todo, están unidas al neumático que hace contacto con la superficie del camino. Es la fuerza del camino sobre los neumáticos lo que detiene al automóvil. **91.** Cuando dos objetos interactúan, las fuerzas que ejercen uno sobre el otro son iguales y opuestas y dichas fuerzas actúan de forma simultánea, de modo que los impulsos son iguales y opuestos. Por tanto, sus cambios en cantidad de movimiento son iguales y opuestos, y el cambio total en la cantidad de movimiento de ambos objetos es cero. **93.** Si consideras a Bronco como el sistema, entonces una fuerza neta actúa y cambia la cantidad de movimiento. En este caso, la cantidad de movimiento no se conserva. Sin embargo, si consideras al sistema como Bronco y el mundo (incluido el aire), entonces todas las fuerzas que actúan son fuerzas internas y la cantidad de movimiento se conserva. La cantidad de movimiento sólo se conserva en los sistemas que no están sujetos a fuerzas externas. **95.** Si el aire se detiene gracias a la vela, entonces el impulso contra la vela es igual y opuesto al impulso sobre el ventilador. No hay impulso neto y no hay cambio en la cantidad de movimiento. El bote permanecerá sin movimiento. ¡Rebotar cuenta! **97.** Las balas que rebotan en la placa de acero ejercen mayor impulso. La placa se mueve más por las balas que rebotan que por las balas que se quedan pegadas. **99.** De acuerdo con el primer amigo porque, después de la colisión, la bola de boliche *tendrá* mayor cantidad de movimiento que la bola de golf. Observa que antes de la colisión, toda la cantidad de movimiento del sistema compuesto por las dos bolas se encuentra en la bola de golf en movimiento. Llama a esto +1 unidad. Entonces, después de la colisión, la cantidad de movimiento de la bola de golf que rebota es casi −1 unidad. La cantidad de movimiento (¡no la rapidez!) de la bola de boliche tendrá que ser de casi +2 unidades. ¿Por qué? Porque sólo entonces su cantidad de movimiento se conserva. La cantidad de movimiento antes es +1 unidad; la cantidad de movimiento después es $(+2 - 1) = +1$. **101.** El impulso es mayor para la reflexión, que en efecto es un rebote. Entonces, las paletas rebotan más en las regiones plateadas. Las paletas en el dibujo giran en sentido de las manecillas del reloj, vistas desde arriba. (Esta rotación es sustituida por una rotación contraria cuando hay aire presente, que es el caso para la mayoría de los radiómetros. La superficie negra absorbe radiación y se calienta, lo que calienta el aire circundante. La superficie se aleja del aire caliente, lo que resulta en un retroceso que hace girar las paletas en sentido contrario a las manecillas del reloj.) **103.** Si una no golpea recto, entonces la bola blanco se aleja en ángulo (por decir, hacia la izquierda) y tiene una componente de cantidad de movimiento perpendicular a la cantidad de movimiento inicial de la bola. Para compensar esto, la bola que golpea no puede simplemente llegar al reposo, sino que debe alejarse en la otra dirección (por decir, hacia la derecha). Hará esto en tal forma que su componente lateral de cantidad de movimiento sea igual y opuesto al de la bola blanco. Esto significa que la cantidad de movimiento lateral total es cero, como era antes de la colisión. (Examina la Figura 6.19 y ve cómo los componentes laterales de la cantidad de movimiento se cancelan.)

## Capítulo 7

### Preguntas conceptuales

**1.** La energía es más evidente cuando está cambiando. **3.** No se realiza ningún trabajo cuando se empuja sobre una pared estacionaria, como en la Figura 7.4. **5.** La energía permite que un objeto realice trabajo. **7.** Tendría el doble de EP porque la distancia es dos veces mayor. **9.** La EP es significativa cuando cambia, realiza trabajo o se transforma en energía de otra forma. **11.** Los frenos deben proporcionar cuatro veces más trabajo. Hay cuatro veces más distancia de frenado (como $2^2 = 4$). **13.** La rapidez tiene poco o ningún efecto sobre la fricción. **15.** Inmediatamente antes de que la manzana golpee el suelo, su EP inicial se convierte en EC. Cuando golpea el suelo su energía se convierte en energía térmica. **17.** Energía reciclada es la reutilización de la energía que de otro modo se desperdiciaría. **19.** Conforme la fuerza aumenta, la distancia disminuye por el mismo factor. **21.** La eficiencia es de 100%. **23.** El Sol es la fuente de estas energías. **25.** No. Al igual que la electricidad, el hidrógeno es un portador de energía, no una fuente. Por ello se necesita energía para separar el hidrógeno de las moléculas.

### Piensa y realiza

**27.** Parte de la energía del balón de básquetbol se transfiere a la pelota de tenis por compresión. Durante la descompresión, el balón de básquetbol empuja la pelota de tenis hacia arriba, mientras que la pelota de tenis empuja al balón de básquetbol hacia abajo. De modo que la EP del balón de básquetbol rebotado es menor y la EP de la pelota de tenis es mayor, pero ambas se suman para igualar las EP originales de las pelotas antes de soltarlas.

### Sustituye y listo

**29.** $W = Fd = (2.0\text{ N})(1.2\text{ m}) = 2.4\text{ N·m} = 2.4\text{ J}$. **31.** $W = Fd = (500\text{ N})(2.2\text{ m}) = 1{,}100\text{ N·m} = 1{,}100\text{ J}$, que también es la ganancia en EP. **33.** $P = \dfrac{W}{t} = \dfrac{Fd}{t} = \dfrac{(500\text{ N})(2.2\text{ m})}{1.4\text{ s}} = 786\text{ W}$. **35.** EP $= mgh = (1{,}000\text{ kg})(10\text{ N/kg})(5\text{ m}) = 50{,}000\text{ N·m} = 50{,}000\text{ J}$. **37.** EC $= \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(84\text{ kg})(10\text{ m/s})^2 = 4{,}200\text{ kg(m/s)}^2 = 4{,}200\text{ J}$. **39.** A partir de $W = \Delta\text{EC}$, $\Delta\text{EC} = Fd = (5{,}000\text{ N})(500\text{ m}) = 2{,}500{,}000\text{ J}$.

### Piensa y resuelve

**41.** Trabajo $= \Delta\text{E} = \Delta mgh = 300\text{ kg} \times 10\text{ N/k} \times 6\text{ m} = 18{,}000\text{ J}$. **43.** A tres veces la rapidez, tiene nueve veces ($3^2$) la EC y se deslizará nueve veces más: 135 m. Dado que la fuerza de fricción es aproximadamente la misma en ambos casos, la distancia tiene que ser nueve veces mayor para nueve veces más trabajo realizado por el pavimento sobre el automóvil. **45.** A partir de $F \times d = F' \times d/4$, se ve que $F' = 4F = 200\text{ N}$.

**47.** $(F \times d)_{\text{entrada}} = (F \times d)_{\text{salida}}$

$F \times 2\text{ m} = 5{,}000\text{ N} \times 0.2\text{ m}$

$F = [(5{,}000\text{ N})(0.2\text{ m})]/2\text{ m} = 500\text{ N}$

**49.** Potencia $= Fd/t = (50\text{ N})(8\text{ m})/(4\text{ s}) = 100\text{ J/1 s} = 100$ watts.

### Piensa y clasifica

**51.** (a) B, A, C; (b) C, B, A; (c) C, B, A **53.** (a) D, B, C, E, A; (b) D, B, C, E, A; (c) A, E, C, B, D

### Piensa y explica

**55.** Detener un camión que lleva una carga ligera con la misma rapidez es más sencillo debido a que tiene menos EC y, por tanto, necesita menos trabajo para detenerse. (También es aceptable una respuesta en términos de impulso y cantidad de movimiento.) **57.** Tu amigo realiza el doble de trabajo ($4 \times ½ > 1 \times 1$). **59.** Se necesita más fuerza para estirar el resorte fuerte, de modo que se necesita más trabajo para estirarlo la misma distancia que un resorte más débil. **61.** La EP calculada del arco tenso sería una sobreestimación (de hecho, aproximadamente el doble de su valor real) porque la fuerza aplicada para tensar el arco comienza en cero y aumenta hasta su valor máximo cuando está completamente tenso. Es fácil ver que se necesita menos fuerza, y en consecuencia menos trabajo, para tensar el arco a la mitad que para tensarlo la segunda mitad hasta su posición de tensado completo. De modo que el trabajo realizado no es *fuerza máxima* × *distancia de tensado*, sino *fuerza promedio* × *distancia de tensado*. En este caso, donde la fuerza varía casi de manera directa con la distancia (y no como el cuadrado o algún otro factor complicado), la fuerza promedio es simplemente igual a fuerza inicial + fuerza final, dividido entre 2. De este modo, la EP es igual a la fuerza promedio aplicada (que sería cerca de la mitad de la fuerza en su posición totalmente tensa) multiplicada por la distancia a través de la cual se tensa la flecha. **63.** De acuerdo, porque la rapidez en sí es relativa al marco de referencia (consulta el Capítulo 3). Por tanto, $½mv^2$ también es relativa a un marco de referencia. **65.** Los dos están en lo correcto con respecto a los marcos de referencia desde donde infieren. La EC es relativa. Desde tu marco de referencia, tu amiga tiene EC considerable porque tiene una gran rapidez. Pero desde su marco de referencia, su rapidez es cero y la EC también es cero. **67.** Sin el uso de una pértiga, la EC de correr horizontalmente no puede transformarse con facilidad en EP gravitacional. Pero doblar una pértiga almacena EP elástica en la pértiga, la que *puede* transformarse en EP gravitacional, de ahí las mayores alturas alcanzadas por los saltadores con pértigas muy elásticas. **69.** Si a la bola se le da una EC inicial, regresará a su posición de partida con esa misma EC (¡moviéndose en la otra dirección!) y golpeará al instructor. (El procedimiento habitual en el salón de clase es soltar la bola desde la nariz en reposo. Entonces, cuando regrese, no tendrá EC y se detendrá poco antes de golpear la nariz.) **71.** De acuerdo con el teorema, una vez que el satélite está en movimiento, no se realiza trabajo sobre él (porque la fuerza gravitacional no tiene componente paralelo al movimiento), de modo que no ocurre cambio en la energía. En consecuencia, el satélite cruza con una rapidez constante. **73.** Las respuestas a ambas son iguales. Cuando la dirección de la fuerza es perpendicular a la dirección de movimiento, como es la fuerza de gravedad tanto en la bola de boliche sobre la bolera como sobre el satélite en órbita circular, no hay ninguna componente de fuerza en la dirección de movimiento, o paralela a ésta, y la fuerza no realiza ningún trabajo. **75.** La tensión de la cuerda es en todas partes perpendicular a la dirección de movimiento de la lenteja, lo cual significa que no hay componente de tensión paralela a la trayectoria de la lenteja y en consecuencia la tensión no realiza ningún trabajo. Por otra parte, la fuerza de gravedad tiene una componente paralela a la dirección de movimiento en todas partes, excepto en el fondo del balanceo, y realiza trabajo, lo cual cambia la EC de la lenteja. **77.** Los 100 J de energía potencial que no se destinan a aumentar su energía cinética se convierten en energía térmica, que calienta sus asentaderas y el tobogán. **79.** Cuando una superbola golpea el suelo, parte de su energía se transforma en calor. Esto significa que tendrá menos energía cinética después del rebote que justo antes y no alcanzará su nivel original. **81.** El diseño es impráctico. Observa que la cima de cada colina en la montaña rusa tiene la misma altura, de modo que la EP del carro en la cima de cada colina sería la misma. Si no se gastara energía para superar la fricción, el carro llegaría a la segunda cima con tanta energía como la que tenía al partir. Pero en la práctica hay mucha fricción y el carro no rodaría hasta su altura inicial ni tendría la misma energía. De modo que la altura máxima de cimas sucesivas deberá ser menor para compensar la fricción. **83.** Resulta suficiente fuerza porque, con cada bombeo del manubrio del gato, la fuerza que ella ejerce actúa sobre una distancia mucho mayor que la que se eleva el automóvil. Una pequeña fuerza que actúa sobre una distancia larga puede hacer trabajo significativo. **85.** Cuando la masa de un objeto se duplica sin cambio de rapidez, su cantidad de movimiento y su EC se duplican. **87.** Ambas tienen la misma cantidad de movimiento, pero la bola de 1 kg, la más rápida, tiene mayor EC. **89.** Cero EC significa cero rapidez, de modo que la cantidad de movimiento también es cero. **91.** En absoluto. Dado que la cantidad de movimiento depende de la velocidad, pero la EC de la rapidez al cuadrado, la que tenga mayor masa tiene mayor cantidad de movimiento. (La relación matemática es $p^2 = 2m \times \text{EC}$.) **93.** Las tijeras y las cizallas son palancas. La fuerza aplicada suele ejercerse sobre una corta distancia para las tijeras, de modo que la fuerza de salida se ejerce sobre una distancia relativamente larga (excepto cuando quieres una gran fuerza de corte como para cortar un trozo de soga gruesa y colocas la soga cerca del "fulcro", de modo que puedes multiplicar la fuerza). Con cizallas para cortar metal, los mangos son largos, de modo que una fuerza de entrada relativamente pequeña se ejerce sobre una distancia larga para producir una fuerza de salida grande sobre una distancia corta. **95.** Un motor que fuera 100% eficiente no se calentaría al tacto, ni expulsaría calor al aire, ni haría ruido, ni vibraría. Esto se debe a que todo lo anterior es transferencia de energía, que no puede ocurrir si toda la energía que se suministra al motor se transforma en trabajo útil. (En realidad, un motor con 100% de eficiencia incluso ni siquiera es posible en principio. Esto se discutirá en el Capítulo 18.) **97.** En concordancia con la conservación de la energía, una persona que consume más energía de la que gasta almacena lo que queda como energía química agregada en el cuerpo, que en la práctica significa más grasa. Quien gasta más energía de la que ingiere tiene que "quemar" la grasa corporal para conseguir energía adicional. Una persona desnutrida, para realizar trabajo adicional tiene que consumir energía química almacenada en el cuerpo, lo que no puede ocurrir durante mucho tiempo sin pérdida de salud, y de la vida.

### Piensa y discute

**99.** Conforme la población mundial continúa aumentando, la producción de energía también debe aumentar para ofrecer estándares de vida dignos. Sin paz, cooperación y seguridad, es probable que la producción de energía a escala global disminuya en lugar de aumentar. **101.** Sí. Un automóvil quema más gasolina cuando sus faros están encendidos. El consumo total de gasolina no depende de si el motor está en marcha o no. Las luces y otros dispositivos se activan con la batería, lo cual "la agota". La energía utilizada para recargar la batería a final de cuentas proviene de la gasolina. **103.** La energía solar es simplemente energía proveniente del Sol. La potencia solar, como la potencia en general, es la *tasa* a la cual se transfiere la energía. Por tanto, la potencia solar es la misma de una hora a otra, mientras que la cantidad de energía solar depende de la cantidad de tiempo que se transfiere la energía. **105.** Un automóvil con sus ventanas abiertas experimenta más arrastre aerodinámico, lo que hace que más combustible se queme para mantener el movimiento. Esto puede más que anular los ahorros derivados de apagar el acondicionador de aire. **107.** Tal vez tu amigo no se da cuenta de que la masa en sí es energía condensada, de modo que puedes decirle que mucha más energía en su forma condensada se pone en el reactor de la que sale del reactor. Cerca de 1% de la masa que experimenta fisión se convierte en energía de otras formas. **109.** Cuando se habla del trabajo realizado, debes entender trabajo realizado *sobre qué, por parte de qué*. El trabajo se realiza sobre el automóvil mediante fuerzas aplicadas que se originan en el motor. El trabajo realizado por la carretera al reaccionar al empuje hacia atrás de los neumáticos es igual al producto de la fuerza aplicada y la distancia recorrida, no la fuerza *neta* que involucra la resistencia del aire y otras fuerzas de fricción. Cuando se realiza trabajo, se piensa en la fuerza aplicada; cuando se considera la aceleración, se piensa en la fuerza neta. En realidad, las fuerzas de fricción de los mecanismos internos del automóvil y en cierta medida de la propia carretera realizan trabajo negativo sobre el automóvil. El trabajo total cero explica por qué la rapidez del automóvil no cambia. **111.** La bola golpea el suelo con la *misma* rapidez, ya sea que se lance hacia arriba o hacia abajo. Las bolas parten con la misma energía en el mismo lugar, de modo que tendrán la misma energía cuando lleguen al suelo. Esto significa que golpearán con la misma rapidez. Esto si supones que la resistencia del aire es despreciable, porque si la resistencia del aire es un factor, entonces la bola lanzada hacia arriba perderá más energía en el aire durante su trayectoria más larga y golpeará con un poco menos de rapidez. Otra forma de ver esto es considerar la Figura 3.8; en ausencia de resistencia del aire, la bola lanzada hacia arriba regresará a su nivel de partida con la misma rapidez que la bola lanzada hacia abajo. Ambas golpean el suelo con la misma rapidez (pero en diferentes *tiempos*). **113.** Los otros 15 caballos de fuerza los suministra la energía eléctrica proveniente de las baterías (que a final de cuentas se recargan usando energía de la gasolina). **115.** La pregunta puede reformularse: ¿$(30^2 - 20^2)$ es mayor o menor que $(20^2 - 10^2)$? Se ve que $(30^2 - 20^2) = (900 - 400) = 500$, lo cual es considerablemente mayor que $(20^2 - 10^2) = (400 - 100) = 300$. De modo que la EC cambia más para una $\Delta v$ dada a una rapidez más alta. **117.** (a) En concordancia con la segunda ley de Newton, la componente de la fuerza gravitacional que es paralela al plano inclinado produce una aceleración paralela al plano. (b) En concordancia con el teorema trabajo-energía, la componente de la fuerza multiplicada por la distancia

que recorre la bola es igual al cambio en la EC de la bola. **119.** En una órbita circular, la fuerza de gravedad en todas partes es perpendicular al movimiento del satélite. Sin una componente de fuerza paralela a su movimiento, no se realiza trabajo y su EC permanece constante. **121.** En el sentido popular, *conservación de energía* significa que no se desperdicia energía. En el sentido físico, *conservación de la energía* se refiere a una ley de la naturaleza que subyace a los procesos naturales. Si bien la energía puede desecharse (lo que en realidad significa transformarse de una forma más útil a una menos útil), no puede destruirse. Ni tampoco puede crearse. La energía se transfiere o se transforma, sin ganancia o pérdida. Eso es a lo que se refiere un físico cuando dice que la energía se conserva.

### Capítulo 8

#### Preguntas conceptuales

**1.** La rapidez tangencial se mide en metros por segundo; la rapidez rotacional en RPM (revoluciones por minuto) o rotaciones por segundo. **3.** El extremo ancho tiene mayor rapidez tangencial que el extremo angosto. **5.** Inercia rotacional es la resistencia a un cambio en el movimiento rotacional. Es similar a la inercia plana, que es una resistencia a un cambio en la velocidad. **7.** La inercia rotacional aumenta con el incremento de la distancia. **9.** Un bate sostenido más cerca de su extremo masivo es más fácil de oscilar. **11.** Un disco sólido tiene menos inercia rotacional y tendrá mayor aceleración. **13.** El brazo de palanca es la distancia más corta entre la fuerza aplicada y el eje de rotación. **15.** El bastón se bambolea, en realidad gira, en torno a su CM (o CG). **17.** Tu CG está abajo de la soga. **19.** Para un equilibrio estable, el CG debe estar arriba de la base de soporte y no extenderse más allá de ella. **21.** Cuando intentas hacerlo, tu CG se extiende fuera de tu base de soporte, de modo que caes. **23.** La fuerza sobre la ropa es hacia adentro. **25.** Ninguna fuerza es responsable; tiendes a moverte hacia adelante en línea recta y el automóvil se curva hacia ti. **27.** El movimiento rotacional da como resultado una fuerza centrífuga que actúa como la fuerza de gravedad. **29.** La cantidad de movimiento angular de un sistema permanece constante cuando no actúa un momento de torsión neto.

#### Piensa y realiza

**31.** Respuesta abierta. **33.** Esto ocurre porque el CG cuelga por abajo del punto de soporte. **35.** ¡Frente a la pared es más difícil! Para ambos sexos el CG se extiende fuera de la base de soporte definida por los talones hasta la pared. **37.** Si la moneda está en la línea hacia el centro de rotación, la fuerza "normal" sobre la moneda proporciona una fuerza centrípeta que la mantiene girando de manera estable.

#### Sustituye y listo

**39.** $\tau = 0.5\text{ m} \times 50\text{ N} = 25\text{ m·N}$. **41.** $F = (80\text{ kg})(3\text{ m/s})^2/2\text{ m} = 360\text{ N}$. **43.** Momento angular $= mvr = (80\text{ kg})(6\text{ m/s})(2\text{ m}) = 960\text{ kg·m}^2/\text{s}$.

#### Piensa y resuelve

**45.** (a) Momento de torsión = fuerza × brazo de palanca = (0.25 m)(80 N) = 20 N·m. (b) Fuerza = 200 N. Entonces, (200 N)(0.10 m) = 20 N·m. (c) Sí. Estas respuestas suponen que tú empujas en sentido perpendicular respecto del mango de la llave. De otro modo, necesitarías ejercer más fuerza para obtener el mismo momento de torsión. **47.** La masa de 1 kg pesa 10 N. En la marca de 50 cm, momento de torsión = 10 N × 0.5 m = 5 N·m; en la marca de 75 cm, momento de torsión = 10 N·0.75 m = 7.5 N·m, y en la marca de 100 cm, momento de torsión = 10 N × 1.0 m = 10 N·m. De modo que en la marca de 75 cm el momento de torsión es 7.5/5 = 1.5 veces mayor, y en la marca de 100 cm, el momento de torsión es el doble de lo que es en la marca de 50 cm. **49.** El artista girará 3 veces por segundo. Por la conservación de la cantidad de movimiento angular, el artista aumentará la tasa de rotación por 3; esto es,

$I\omega_{\text{antes}} = I\omega_{\text{después}}$

$I\omega_{\text{antes}} = [(\frac{1}{3})I(3\omega)]_{\text{después}}$

#### Piensa y clasifica

**51.** B, C, A **53.** B, A, C **55.** C, A, B

#### Piensa y explica

**57.** Los neumáticos de Sue tienen mayor rapidez rotacional porque deben girar más veces para cubrir la misma distancia. **59.** La cantidad de inclinación se relaciona con la cantidad de curvatura que tiene la vía. En una curva donde la vía exterior es, por decir, 10% más larga que la vía interior, la parte ancha de la rueda también tendrá que ser al menos 10% más ancha que la parte angosta. Si es menos que esto, la rueda exterior se apoyará en el borde para permanecer en la vía, y habrá raspaduras conforme el tren negocie la curva. Mientras más "cerrada" sea la curva, mayor será la inclinación necesaria para estar sobre las ruedas. **61.** Inercia rotacional y momento de torsión son los conceptos principales ilustrados aquí, y la conservación de la cantidad de movimiento angular también es importante. La distancia larga respecto de las ruedas delanteras aumenta la inercia rotacional del vehículo en relación con las ruedas traseras y también aumenta el brazo de palanca de las ruedas delanteras sin sumarse mucho al peso del vehículo. A medida que las ruedas traseras se mueven en sentido de las manecillas del reloj, el chasis tiende a girar contra las manecillas del reloj (conservación de cantidad de movimiento angular) y, por tanto, a levantar las ruedas delanteras del suelo. La mayor inercia rotacional y el creciente momento de torsión, en sentido de las manecillas del reloj, de las ruedas delanteras más distantes contrarrestan este efecto. **63.** La bola que llega primero al fondo es aquella con la inercia rotacional más pequeña comparada con su masa: la de softball. **65.** No. Por definición, un momento de torsión exige tanto una fuerza como un brazo de palanca. **67.** No, porque hay brazo de palanca cero en torno al CM. Un brazo de palanca cero significa un momento de torsión cero. **69.** Un autobús que se balancea parcialmente gira parcialmente en torno a su CM, que está cerca de su parte media. Cuanto más lejos se siente uno del CM, mayor será el movimiento hacia arriba y hacia abajo, como en un subibaja. Lo mismo ocurre con el movimiento de un barco en mar picado o en un avión en aire turbulento. **71.** La pértiga larga baja el CG del sistema equilibrado: el funámbulo y la pértiga. La inercia rotacional de la pértiga también contribuye a la estabilidad. **73.** El movimiento bamboleante de una estrella es indicio de que gira alrededor de un centro de masa que no está en su centro geométrico, lo que implica que existe alguna otra masa cercana que jala el centro de masa lejos del centro de la estrella. Ésta es una manera en la que los astrónomos han descubierto planetas que existen alrededor de estrellas distintas del Sol. **75.** La atmósfera de la Tierra es un cascarón casi esférico, que, como un balón de básquetbol, tiene su centro de masa en su centro; esto es, en el centro de la Tierra. **77.** Es peligroso abrir los cajones superiores de un archivero completamente lleno que no está asegurado al suelo, porque el CG del archivero puede desplazarse con facilidad fuera de la base de soporte del archivero. Cuando esto sucede, el momento de torsión que se produce hace que el archivero se venga abajo. **79.** El CG del camión de la izquierda no está arriba de su base de soporte; el CG de los otros dos camiones está arriba de sus bases de soporte. Por tanto, sólo el primer camión se volteará. **81.** No. De acuerdo con la primera ley de Newton, en ausencia de una fuerza, un objeto en movimiento sigue una trayectoria en línea recta. **83.** La primera y tercera leyes de Newton ofrecen una explicación directa. Tiendes a moverte en línea recta (primera ley de Newton), pero eres interceptado por la puerta. Presionas contra la puerta porque la puerta presiona contra ti (tercera ley de Newton). El empujón de la puerta proporciona la fuerza centrípeta que te mantiene en movimiento en una trayectoria curva. Sin el empujón de la puerta, no girarías con el automóvil; te moverías a lo largo de una línea recta y serías "lanzado". La explicación no necesita invocar a la fuerza centrífuga. **85.** Un automóvil puede permanecer en una pista totalmente resbalosa si el componente horizontal de su fuerza normal es suficiente para proporcionar la fuerza centrípeta necesaria. **87.** En concordancia con la primera ley de Newton, en cada momento la tendencia del ocupante es a moverse en una trayectoria en línea recta. Pero el suelo intercepta esta trayectoria y ocurre un par de fuerzas; el suelo presiona contra sus pies y sus pies presionan contra el suelo: tercera ley de Newton. El empujón del suelo sobre sus pies proporciona la fuerza centrípeta que la mantiene en movimiento en un círculo con el hábitat. Ella percibe esto como una gravedad artificial. **89.** (a) Excepto por la fuerza de fricción vertical, no hay otra fuerza vertical más que el peso de la motocicleta + el conductor. (b) El vector horizontal representa la fuerza normal. Dado que es la única fuerza que actúa en la dirección radial, horizontalmente, también es la fuerza centrípeta. De modo que es ambas. **91.** Conforme te desplazas hacia afuera, la inercia rotacional del sistema aumenta (como las masas sostenidas hacia afuera en la Figura 8.52). En concordancia con la conservación de la cantidad de movimiento angular, desplazarse hacia el borde exterior aumenta la inercia rotacional del sistema en rotación y reduce la rapidez angular. **93.** El suelo que se barre hacia el río se deposita a mayor distancia del eje de rotación de la Tierra. Así como el hombre en la tornamesa frena cuando una de las masas se extiende, la Tierra frena en su movimiento rotacional y extiende la duración del día. Desde luego, la cantidad de frenado es muy pequeña. **95.** En concordancia con la conservación de la cantidad de movimiento angular, conforme la distancia radial de la masa aumenta, la rapidez angular disminuye. La masa del material usado para construir rascacielos se levanta, lo que aumenta un poco la distancia radial respecto del eje de rotación de la Tierra, lo cual tiende a reducir ligeramente la tasa de rotación de la Tierra, y a hacer los días un poco más largos. El efecto contrario ocurre con las hojas que caen conforme disminuye su distancia radial respecto del eje de la Tierra. Para fines prácticos, ¡estos efectos son completamente despreciables! **97.** En concordancia con la conservación de la cantidad de movimiento angular, si la masa se aleja más del eje de rotación, como sucede con las capas de hielo que se funden, la rapidez rotacional disminuye. De modo que la Tierra frenaría en su rotación diaria. **99.** La fuerza gravitacional que actúa sobre toda partícula por toda otra partícula hace que la nube se condense. Entonces, la

disminución del radio de la nube se acompaña de un aumento en la rapidez angular debido a la conservación de la cantidad de movimiento angular. El aumento de rapidez resulta en que muchas estrellas se lanzan hacia una forma de disco.

### Piensa y discute

**101.** Los neumáticos con diámetro grande significan que viajas más lejos con cada revolución del neumático. De modo que te moverás más rápido de lo que indica tu velocímetro. (Un velocímetro en realidad mide las RPM de las ruedas y muestra esto como mi/h o km/h. La conversión de RPM a la lectura en mi/h o km/h supone que las ruedas tienen cierto tamaño.) Las ruedas de gran tamaño proporcionan una lectura muy baja porque en realidad recorren más distancia por revolución de lo que indica el velocímetro, y una rueda de menor tamaño proporciona una lectura muy alta porque las ruedas no van tan rápido por revolución. **103.** Dos condiciones son necesarias para el equilibrio mecánico: $\Sigma F = 0$ y $\Sigma$*momento de torsión* $= 0$. **105.** La fricción del camino sobre las llantas produce un momento de torsión en torno al CM del automóvil. Cuando el automóvil acelera hacia adelante, la fuerza de fricción apunta hacia adelante y gira el frente del automóvil hacia arriba. Cuando el automóvil frena, la dirección de la fricción es hacia atrás, y el momento de torsión hace girar al automóvil en la dirección opuesta, de modo que el extremo posterior gira hacia arriba (y la nariz hacia abajo). **107.** El agua se desliza al interior de la lata, mientras que el hielo rueda junto con la lata. Cuando el agua en el interior se desliza, aporta peso en lugar de inercia rotacional a la lata. De modo que la lata con agua rodará más rápido. (Incluso vencerá a una lata hueca.) **109.** Aconseja al niño usar ruedas con la mínima inercia rotacional: las que son sólidas y ligeras sin rayos (con forma de disco en lugar de aro). **111.** El peso del niño se compensa con el peso del tablón, que puede considerarse como concentrado en su CG en el lado opuesto del fulcro. Está en equilibrio cuando su peso multiplicado por su distancia respecto del fulcro es igual al peso de todo el tablón multiplicado por la distancia entre el fulcro y el punto medio (CG) del tablón. (¿Cómo se relacionan los pesos relativos del niño y del tablón con los brazos de palanca relativos?) **113.** La pista permanece en equilibrio conforme las bolas ruedan hacia afuera y hasta que la bola rueda fuera de la pista. Esto es así porque el CG del sistema permanece sobre el fulcro. Por ejemplo, supón que la bola de billar tiene el doble de masa que la bola de golf. Por conservación de la cantidad de movimiento, la bola con el doble de masa rodará hacia afuera a la mitad de la rapidez de la bola más ligera, y en cualquier tiempo estará a la mitad del punto de partida que la bola más ligera. De modo que no hay cambio en el CG del sistema de las dos bolas. Los momentos de torsión producidos por los pesos de las bolas multiplicados por sus distancias relativas respecto del fulcro son iguales en todos los puntos, porque en cualquier momento la bola menos masiva tiene un brazo de palanca correspondientemente más largo. **115.** El ecuador tiene una mayor rapidez tangencial que las latitudes al norte o al sur. Cuando un proyectil se lanza desde alguna latitud, la rapidez tangencial de la Tierra se imparte al proyectil, y a menos que se hagan correcciones, el proyectil fallará un blanco que viaje con la Tierra a una rapidez tangencial diferente. Por ejemplo, si un cohete se dispara al sur desde la frontera canadiense hacia la frontera mexicana, su componente canadiense de rapidez debido al giro de la Tierra es menor que la rapidez tangencial de la Tierra más hacia el sur. La frontera mexicana se mueve más rápido y el cohete se queda corto. Debido a que la Tierra gira hacia el este, el cohete aterriza al oeste de su longitud pretendida. (En un tiovivo, intenta lanzar una bola de ida y vuelta con tus amigos. El nombre de esta alternación debida a la rotación es efecto Coriolis.)

## Capítulo 9

### Preguntas conceptuales

**1.** Newton descubrió que la gravedad es universal. **3.** La Luna se aleja de la línea recta que seguiría si no hubiera fuerza gravitacional que actuara sobre ella. **5.** La fuerza gravitacional es $6 \times 10^{-11}$ N. **7.** En realidad, la masa de la Tierra podría calcularse entonces, pero pesar la Tierra tenía un tono más popular. **9.** El grosor es de un cuarto. **11.** Los resortes estarían más comprimidos cuando aceleraran hacia arriba; menos comprimidos cuando aceleraran hacia abajo. **13.** Tu peso se mide como *mg* cuando estás firmemente apoyado y en equilibrio. **15.** Los ocupantes están sin una fuerza de sostén. **17.** Un lado está más cerca. **19.** Sí. Las mareas interiores son causadas por fuerzas desiguales sobre lados opuestos del interior de la Tierra. **21.** No. Ningún brazo de palanca existiría entre el jalón gravitacional de la Tierra y el eje de la Luna. **23.** En el centro de la Tierra, su campo gravitacional es cero. **25.** En cualquier parte del interior de un planeta hueco el campo gravitacional del planeta sería cero. **27.** Tu peso aumentaría. **29.** Un agujero negro es invisible porque ni siquiera la luz puede escapar de él.

### Piensa y realiza

**31.** Respuesta abierta.

### Sustituye y listo

**33.** $F = G\dfrac{m_1 m_2}{d^2} = 6.67\times10^{-11}\,\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2 \times \dfrac{(1\text{ kg})(6\times10^{24}\text{ kg})}{(6.4\times10^{6}\text{ m})^2} = 9.8\text{ N}$

**35.** $F = G\dfrac{m_1 m_2}{d^2} = 6.67\times10^{-11}\,\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2 \times \dfrac{(6\times10^{24}\text{ kg})(7.4\times10^{22}\text{kg})}{(3.8\times10^{8}\text{ m})^2} = 2.1\times10^{20}\text{ N}$

**37.** $F = G\dfrac{m_1 m_2}{d^2} = 6.67\times10^{-11}\,\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2 \times \dfrac{(3\text{ kg})(6.4\times10^{23}\text{ kg})}{(5.6\times10^{10}\text{ m})^2} = 4.1\times10^{-8}\text{ N}$

### Piensa y resuelve

**39.** A partir de $F = GmM/d^2$, tres veces $d$ al cuadrado es 9 $d^2$, lo cual significa que la fuerza es un noveno del peso superficial.

**41.** A partir de $F = G2m2M/(2d^2) = 4/4\ (GmM/d^2)$, con la misma fuerza de gravitación.

**43.** $g = \dfrac{GM}{d^2} = \dfrac{(6.67\times10^{-11})(6.0\times10^{24})}{[(6{,}380+200)\times10^{3}]^2} = 9.24\text{ N/kg}$ o $9.24\text{ m/s}^2$;

$9.24/9.8 = 0.94$ o **94%.**

### Piensa y clasifica

**45.** B = C, A, D **47.** (a) B, A = C, D; (b) D, A = C, B **49.** B, A, C

### Ejercicios

**51.** Esto se remonta al Capítulo 4. Un cuerpo pesado no cae más rápido que un cuerpo ligero porque la mayor fuerza gravitacional sobre el cuerpo más pesado (su peso) actúa sobre una masa correspondientemente más grande (inercia). La razón entre fuerza gravitacional y masa es la misma para todos los cuerpos, de ahí que todos los cuerpos en caída libre aceleren igualmente. **53.** La fuerza de gravedad es la misma sobre cada uno porque las masas son iguales, como lo demuestra la ecuación para fuerza gravitacional de Newton. **55.** La fuerza disminuye como el cuadrado de distancia creciente, o la fuerza aumenta con el cuadrado de la distancia decreciente. **57.** En concordancia con la tercera ley de Newton, el peso de la Tierra en el campo gravitacional de Larry es 300 N, lo mismo que el peso de Larry en el campo gravitacional de la Tierra. **59.** Si dejas que la ecuación de la gravitación guíe tu razonamiento, el doble de diámetro es el doble de radio, lo que corresponde a 1/4 el peso del astronauta en la superficie del planeta. **61.** Tu peso disminuiría si la Tierra se expandiera sin cambio en su masa y aumentaría si la Tierra se contrajera sin cambio en su masa. Tu masa y la masa de la Tierra no cambian, pero la distancia entre tú y el centro de la Tierra sí cambia. La fuerza es proporcional al inverso al cuadrado de esta distancia. **63.** El jet que vuela alto no está en caída libre. Se mueve con velocidad aproximadamente constante, de modo que un pasajero no experimenta fuerza neta. La fuerza de sostén hacia arriba del asiento coincide con el jalón descendente de la gravedad, lo que proporciona la sensación de peso. El vehículo espacial en órbita, por otro lado, está en un estado de caída libre. El asiento no ofrece fuerza de sostén porque cae con la misma tasa que el pasajero. Sin fuerza de sostén, la fuerza de gravedad sobre el pasajero no se percibe como peso. **65.** En un automóvil que salta de una colina tú "flotas" porque el automóvil ya no ofrece una fuerza de sostén. Tanto tú como el automóvil están en el mismo estado de caída libre. Pero la gravedad todavía actúa sobre ti, como lo demuestra tu aceleración hacia el suelo. De modo que, por definición, tú estarías ingrávido (hasta que la resistencia del aire se vuelva importante). **67.** El lápiz tiene el mismo estado de movimiento que tú. La fuerza de gravedad sobre el lápiz hace que acelere hacia abajo junto contigo. Aunque el lápiz flota en relación contigo, él y tú caen en relación con la Tierra. **69.** No estás de acuerdo porque la fuerza de gravedad sobre los astronautas en órbita es casi tan fuerte como en la superficie de la Tierra. Ellos sienten ingravidez debido a la ausencia de una fuerza de sostén. **71.** Tu peso es igual a *mg* cuando estás en equilibrio sobre una superficie horizontal y las únicas fuerzas que actúan sobre ti son *mg* hacia abajo y una fuerza normal, igual y opuesta, *N* hacia arriba. **73.** La fuerza debida a la gravedad, *mg*, no varía con los saltos. Las variaciones en las lecturas de la báscula son variaciones en la fuerza de sostén *N*, no en *mg*. **75.** El jalón gravitacional del Sol sobre la Tierra es mayor que el jalón gravitacional de la Luna. Sin embargo, las mareas son causadas por las *diferencias* en las fuerzas gravitacionales de la Luna sobre lados

opuestos de la Tierra. La diferencia en fuerzas gravitacionales de la Luna sobre lados opuestos de la Tierra es mayor que la diferencia correspondiente en las fuerzas por el jalón más fuerte pero mucho más distante del Sol. **77.** No. Las mareas son causadas por diferencias en jalones gravitacionales. Si no hubiera diferencias en los jalones, no habría mareas. **79.** Las mareas más bajas ocurren junto con mareas más altas: mareas vivas. De modo que el ciclo de marea viva consiste en mareas más altas que la altura promedio, seguidas por mareas más bajas que el bajo promedio (¡mejor para buscar almejas!). **81.** Debido a su tamaño relativamente pequeño, diferentes partes del Mediterráneo y otros cuerpos de agua relativamente pequeños en esencia están equidistantes de la Luna (o del Sol). De modo que ninguna parte es jalada con una fuerza muy diferente que cualquiera otra parte. Esto resulta en mareas extremadamente pequeñas. Las mareas son causadas por diferencias considerables en los jalones. **83.** En concordancia con la ley del inverso al cuadrado, el doble de distancia desde el centro de la Tierra disminuye el valor de $g$ a ¼ su valor en la superficie, o 2.5 m/s$^2$. **85.** Tu peso disminuiría en el tiro de la mina. Una forma de explicar esto es considerar que la masa de la Tierra que está arriba de ti te jala hacia arriba. Este efecto reduce tu peso, de la misma manera como se reduce si alguien te jala hacia arriba mientras estás parado sobre una báscula. O, de manera más exacta, se ve que tú efectivamente estás dentro de un cascarón esférico donde la aportación del campo gravitacional es cero, y que tú eres jalado sólo por la porción esférica abajo de ti. Eres más ligero mientras más profundo vayas, y si el tiro de la mina teóricamente continuara hacia el centro de la Tierra, tu peso se acercaría cada vez más a cero. **87.** Respuesta abierta.

### Piensa y discute

**89.** La fuerza de gravedad sobre las rocas lunares en la superficie de la Luna es mucho más fuerte que la fuerza de gravedad de la Tierra distante. Las rocas soltadas sobre la Luna caen sobre la superficie de la Luna. (La fuerza de la gravedad de la Luna es aproximadamente 1/6 del peso que la roca tendría en la Tierra, pero la fuerza de la gravedad de la Tierra a dicha distancia sólo es de aproximadamente 1/3,600 el peso terrestre de la roca.) **91.** La ubicación está más cerca de la Luna debido a su masa más pequeña y su menor jalón a distancias iguales. **93.** La Tierra y la Luna *sí* giran alrededor de un punto común, pero no está a medio camino entre ellas (lo que requeriría que tanto la Tierra como la Luna tuvieran la misma masa). El punto en torno al cual giran la Tierra y la Luna (llamado *baricentro*) está dentro de la Tierra, aproximadamente a 4,600 km del centro de la Tierra. **95.** Por la geometría de la Figura 9.4, triplicar la distancia desde la fuente pequeña dispersa la luz sobre 9 veces el área, o 9 m$^2$. Cinco veces la distancia dispersa la luz sobre 25 veces el área o 25 m$^2$, y 10 veces la distancia, 100 m$^2$. **97.** Si la Tierra ganara masa, tú ganarías peso. Debido a que la Tierra está en caída libre alrededor del Sol, el Sol no contribuye a tu peso. La gravitación terrestre te presiona contra la Tierra; la gravitación solar no te presiona contra la Tierra. **99.** La fuerza gravitacional varía con la distancia. A mediodía estás más cerca del Sol; a medianoche estás un diámetro terrestre adicional más alejado. Por tanto, la fuerza gravitacional del Sol sobre ti es mayor a mediodía. **101.** La Luna sí gira como una peonza conforme da vueltas alrededor de la Tierra. Gira una vez por revolución, por lo cual se ve sólo la misma cara. Si no girara, verías el reverso cada medio mes. **103.** Tierra. Las micromareas son más grandes donde la diferencia entre tu cabeza y tus pies es mayor comparada con la distancia respecto del cuerpo que jala, la Tierra. **105.** Se necesita más combustible para que un cohete que sale de la Tierra vaya a la Luna que al revés. Esto es así porque un cohete debe moverse contra el mayor campo gravitacional de la Tierra la mayor parte del camino. (Si se lanzara desde la Luna hacia la Tierra, el cohete viajaría con el campo de la Tierra la mayor parte del camino.) **107.** $F \sim m_1 m_2 / d^2$, donde $m_2$ es la masa del Sol (que no cambia cuando forma un agujero negro), $m_1$ es la masa de la Tierra en órbita y $d$ es la distancia entre el centro de masa de la Tierra y el Sol. Ninguno de estos términos cambia, de modo que la fuerza $F$ que mantiene a la Tierra en órbita no cambia. **109.** Los astronautas están ingrávidos porque carecen de una fuerza de sostén, pero están firmemente asidos a la gravedad terrestre, lo cual explica que den vueltas alrededor de la Tierra en lugar de salir disparados en línea recta hacia el espacio exterior.

## Capítulo 10

### Preguntas conceptuales

**1.** Un proyectil es cualquier objeto que se proyecta por algún medio y continúa en movimiento por su propia inercia. **3.** Sin resistencia del aire la componente horizontal de la velocidad permanece constante, tanto al subir como al caer. **5.** En 1 s, el proyectil cae 5 m bajo la línea; en 2 s, 20 m bajo ella. **7.** Un ángulo de 15° produciría el mismo rango, en concordancia con la Figura 10.11. **9.** Un proyectil puede caer alrededor de la Tierra si tiene suficiente rapidez tangencial de modo que su curva hacia abajo no sea más aguda que la de la curvatura de la Tierra. **11.** Un satélite tiene que permanecer arriba de la atmósfera porque la resistencia del aire no sólo lo frenaría sino que lo quemaría por su gran rapidez. Un satélite no debe luchar con alguno de éstos. **13.** La rapidez de un satélite no cambia cuando no hay una componente de fuerza gravitacional en la dirección de su movimiento. **15.** El periodo para satélites a mayores altitudes es más largo que 90 minutos. **17.** Un satélite tiene la mayor rapidez cuando está más cerca de la Tierra, y la menor rapidez cuando está más alejado. **19.** Kepler descubrió que el periodo al cuadrado era proporcional a la distancia radial al cubo. **21.** La EC es constante porque la gravedad no realiza ningún trabajo sobre el satélite. **23.** Sí. La rapidez de escape puede ser a rapideces menores que 11.2 km/s si dicha rapidez es *sostenida*.

### Piensa y realiza

**25.** Descubrir esta conexión entre el agua que cae y satélites que caen fue un momento "ajá" para PGH mientras daba vueltas a un balde con agua durante una demostración pedagógica del movimiento rotacional, un día cuando se discutió el lanzamiento de un satélite muy publicitado. ¡Qué emocionante es descubrir conexiones en la naturaleza!

### Piensa y resuelve

**27.** (a) A partir de $y = 5t^2 = 5(30)^2 = 4{,}500$ m, o 4.5 km de altura (4.4 km si usas $g = 9.8$ m/s$^2$). (b) En 30 segundos; $d = vt = 280$ m/s $\times$ 30 s $= 8{,}400$ m. (c) El motor está directamente abajo del avión. (En un caso más práctico, el avión supera la resistencia del aire gracias a sus motores, pero eso no sucede con el motor que cae, de modo que la rapidez del motor se reduce por el arrastre aerodinámico y cubre menos que 8,400 metros horizontales, y aterriza detrás del avión.) **29.** En lo alto de su trayectoria, la componente vertical de la velocidad es cero, lo que deja sólo la componente horizontal. La componente horizontal en lo alto o en cualquier parte de la trayectoria es la misma que la componente horizontal inicial, 100 m/s (el lado de un cuadrado donde la diagonal es 141). **31.** Energía total = 5,000 MJ + 4,500 MJ = 9,500 MJ. Resta 6,000 MJ y EC = **3,500 MJ**. **33.** El tiempo "de vuelo" depende sólo de la componente vertical de la velocidad inicial y de la correspondiente distancia vertical alcanzada. A partir de $d = 5t^2$, un salto vertical de 1.25 m corresponde a 0.5 s ($t = \sqrt{2d/g} = \sqrt{2(1.25)/10} = 0.5$ s). Duplica esto (tiempo hacia arriba y tiempo hacia abajo) para un tiempo en el aire de 1 s. El tiempo en el aire es el mismo cualquiera que sea la distancia horizontal recorrida.

### Piensa y clasifica

**35.** (a) B, C, A, D; (b) B, D, A, C; (c) A = B = C = D (10 m/s$^2$) **37.** (a) A, B, C; (b) C, B, A

### Piensa y explica

**39.** Los clavadistas pueden orientar sus cuerpos para cambiar la fuerza de la resistencia del aire de modo que la razón de la fuerza *neta* con respecto a la masa sea casi la misma para cada uno. **41.** Sí. Golpeará con mayor rapidez en el mismo tiempo porque la componente horizontal (no la vertical) de movimiento es mayor. **43.** La caja no golpeará al Porsche, sino que caerá a una distancia más lejana que está determinada por la altura y la rapidez del avión. **45.** (a) La trayectoria es una parábola. (b) Las trayectorias serían líneas rectas. **47.** La rapidez mínima de la bola ocurre en la parte superior, que es la misma que la componente horizontal de la velocidad en cualquier parte a lo largo de la trayectoria. **49.** Ambas bolas tienen el mismo rango (consulta la Figura 10.9). Sin embargo, la bola con el ángulo de proyección inicial de 30° está en el aire durante un tiempo más corto y golpea el suelo primero. **51.** Cualquier objeto proyectado en sentido vertical tiene rapidez cero en la parte superior de su trayectoria. Pero si se dispara en un ángulo, sólo su componente vertical de velocidad es cero y la velocidad del proyectil en la parte superior es igual a su componente horizontal de velocidad. Esto sería 100 m/s cuando el proyectil de 141 m/s se dispare a 45°. **53.** El tiempo "de vuelo" será el mismo. El tiempo de vuelo se relaciona con la altura vertical alcanzada en un salto, no con la distancia horizontal recorrida en un suelo plano. **55.** De acuerdo con la tercera ley de Kepler, $T^2 \sim R^3$, el periodo es mayor cuando la distancia es mayor. De modo que los periodos de los planetas más alejados del Sol son más largos que el año terrestre. **57.** La rapidez no depende de la masa de un objeto o un satélite que cae (como la rapidez de caída libre no lo hace). **59.** La gravitación suministra la fuerza centrípeta para los satélites. **61.** La gravedad cambia la rapidez de una bala de cañón cuando la bala se mueve en la dirección de la gravedad de la Tierra. A rapideces bajas, la bala de cañón se curva hacia abajo y gana rapidez porque existe una componente de la fuerza de gravedad a lo largo de su dirección de movimiento. Sin embargo, disparada con suficiente rapidez, la curvatura coincide con la curvatura de la Tierra, de modo que la bala de cañón se mueve en ángulo recto con la fuerza de gravedad. Sin componente de fuerza a lo largo de su dirección de movimiento, su rapidez permanece constante. **63.** Un satélite viaja más rápido cuando está más cerca del cuerpo que orbita. Por tanto, la Tierra viaja más

rápido alrededor del Sol en diciembre que en junio. **65.** La componente a lo largo de la dirección de movimiento realiza trabajo sobre el satélite para cambiar su rapidez. La componente perpendicular a la dirección de movimiento cambia su dirección de movimiento. **67.** Cuando la velocidad de un satélite es en todas partes perpendicular a la fuerza de gravedad, la trayectoria orbital es un círculo (consulta la Figura 10.30). **69.** De ninguna manera. El centro de la Tierra es un foco de la trayectoria elíptica (incluido el caso especial de un círculo), de modo que un satélite terrestre orbita el centro de la Tierra. El plano de un satélite que viaja en órbita siempre interseca el centro de la Tierra.

**71.** Si una caja de herramientas o cualquier cosa se "suelta" desde un vehículo espacial en órbita, tiene la misma rapidez tangencial que el vehículo y permanece en órbita. Si una caja de herramientas se suelta desde un jet que vuela alto, también tiene la rapidez tangencial del jet. Pero esta rapidez es insuficiente para que la caja caiga alrededor de la Tierra. En lugar de ello, pronto cae a la Tierra. **73.** Cuando una cápsula se proyecta hacia atrás a 7 km/s con respecto a la nave espacial, que en sí misma se mueve hacia adelante a 7 km/s con respecto a la Tierra, la rapidez de la cápsula con respecto a la Tierra será cero. No tendrá rapidez tangencial para orbitar. ¿Qué sucederá? Simplemente caerá en sentido vertical hacia la Tierra y chocará. **75.** La velocidad tangencial de la Tierra alrededor del Sol es 30 km/s. Si un cohete que lleva los desechos radiactivos se disparara a 30 km/s desde la Tierra en la dirección opuesta al movimiento orbital de la Tierra alrededor del Sol, los desechos no tendrían velocidad tangencial con respecto al Sol. Sólo caerían hacia el Sol. **77.** Hay varias ventajas potenciales. Una principal es evitar los costosos cohetes de primera etapa. Además, la aeronave, al volar hacia el este, puede impartir rapidez inicial agregada al vehículo espacial. Y el vehículo espacial tiene menos resistencia de aire que superar y un poco menos EP para remontar. **79.** La máxima rapidez de caída en virtud sólo de la gravedad de la Tierra es 11.2 km/s (consulta la Tabla 10.1 o la nota al pie 5 del capítulo). **81.** El satélite experimenta la mayor fuerza gravitacional en A, donde está más cerca de la Tierra, el perigeo. Experimenta la mayor rapidez y la mayor velocidad en A, y por la misma razón, la mayor cantidad de movimiento y la mayor energía cinética en A. Tiene la mayor energía potencial gravitacional en el punto más lejano C. Tiene la misma energía total (EC + EP) en todas partes de su órbita, al igual que la misma cantidad de movimiento angular porque se conserva. Tiene la mayor aceleración en A, donde $F/m$ es mayor.

### Piensa y discute

**83.** Al patear el balón en ángulos mayores que 45° se sacrifica cierta distancia para ganar tiempo adicional. Un balón pateado a más de 45° no va muy lejos, pero permanece en el aire más tiempo, lo que da a los jugadores del equipo que patea una oportunidad para correr por el campo y acercarse al jugador del otro equipo que recibe el balón. **85.** Marte o cualquier cuerpo en la órbita de la Tierra tardarían el mismo tiempo para orbitar. El movimiento de un satélite, como el de un objeto en caída libre, no depende de la masa. **87.** Los cohetes para poner satélites en órbita se disparan hacia el este para aprovechar el giro de la Tierra. Cualquier punto sobre el ecuador de la Tierra se mueve a casi 0.5 km/s con respecto al centro de la Tierra o el eje polar de la Tierra. Esta rapidez adicional no tienen que proporcionarla los motores del cohete. A latitudes más altas, este "viaje extragratuito" es menor. **89.** La Luna no tiene atmósfera porque la velocidad de escape en la superficie de la Luna es menor que la rapidez de cualquier gas atmosférico. Un satélite 5 km arriba de la superficie de la Tierra todavía está en una atmósfera considerable así como en el rango de algunos picos montañosos. El arrastre atmosférico es el factor que más determina la altitud orbital. **91.** Singapur se encuentra en el ecuador de la Tierra. El plano de la órbita ecuatorial del satélite incluye Singapur, de modo que un satélite puede localizarse directamente arriba de Singapur. Pero en San Francisco, un satélite geosíncrono sobre el ecuador es visto en un ángulo con la vertical, no directamente sobre la cabeza. **93.** A medianoche no miras al Sol y, por tanto, no puedes ver los planetas más cercanos al Sol: Mercurio y Venus (que se encuentran dentro de la órbita de la Tierra). **95.** No, porque una órbita en el plano del Círculo Ártico no interseca el centro de la Tierra. Todos los satélites terrestres orbitan en un plano que interseca el centro de la Tierra. Un satélite puede pasar sobre el Círculo Ártico, mas no puede permanecer arriba de él de manera indefinida, como un satélite puede hacerlo sobre el ecuador. **97.** El sistema GPS "triangula" para mostrar las posiciones. Un satélite puede decir la distancia entre el satélite y el receptor, y dos tal vez la longitud, pero se necesitan tres para altitud, longitud y latitud. **99.** El diseño es bueno. La rotación proporcionaría una fuerza centrípeta sobre los ocupantes. Espera este diseño en los futuros hábitats espaciales.

## Capítulo 11

### Preguntas conceptuales

**1.** John Dalton anticipó la idea de los átomos. **3.** Albert Einstein explicó el movimiento browniano. **5.** La mayoría de los átomos a tu alrededor son más antiguos que el Sol. **7.** Los átomos son más grandes que la longitud de onda de un haz de electrones. **9.** Casi toda la masa de un átomo se concentra en su núcleo. **11.** La carga eléctrica es la misma en los protones y los electrones, con lo positivo del protón y lo negativo del electrón. **13.** El hidrógeno tiene los átomos más ligeros. **15.** Los átomos más pesados se forman por fusión en el interior de las estrellas. **17.** Oxígeno, carbono, hidrógeno, nitrógeno y calcio son los más comunes en el ser humano. **19.** El máximo número de capas en los átomos es siete. **21.** Los átomos más pesados no son mucho más grandes debido a que la carga más grande del núcleo ejerce una mayor atracción eléctrica. **23.** El número de masa es el número de protones y neutrones en el núcleo, un entero. La masa atómica es la masa total de un átomo, en gramos, kilogramos o unidades de masa atómica. **25.** Una mezcla es una sustancia mezclada sin enlace químico, por ejemplo, arena y sal, o aire. **27.** La energía es la misma: energía de separación igual a energía de recombinación. **29.** Cuando la materia encuentra antimateria, masas iguales de cada una se aniquilan.

### Piensa y realiza

**31.** Sí. La vela arderá el doble de tiempo porque hay el doble de oxígeno en el frasco con el doble de tamaño.

### Piensa y clasifica

**33.** (a) A, D, B, C; (b). A, D, B, C; (c) A, D, B, C **35.** A, B, D, C

### Piensa y explica

**37.** En una molécula de agua, $H_2O$, existen tres átomos, dos de hidrógeno y uno de oxígeno. **39.** La rapidez a la cual viaja la esencia de una fragancia es mucho menor que la rapidez de cada una de las moléculas que la constituyen debido a las muchas colisiones entre las moléculas. Aunque la rapidez molecular entre colisiones es grande, la tasa de migración en una dirección particular a través de moléculas que obstruyen es mucho menor. **41.** $H_2$, He, Na y U son elementos puros; $H_2O$ y NaCl son compuestos hechos con dos elementos; y tres elementos diferentes contribuyen al $H_2SO_4$. **43.** El movimiento browniano se debe a que más átomos o moléculas saltan contra un lado de una pequeña partícula que en el otro. Esto produce una fuerza neta sobre la partícula, que altera su movimiento. Dicho movimiento browniano no se observa en partículas más grandes porque el número de saltos sobre lados opuestos es casi igual, y la inercia de la partícula más grande es mayor. Cualquier movimiento browniano de una pelota de béisbol sería imperceptible. El número de saltos sobre una pelota de béisbol prácticamente es el mismo en todos lados, sin fuerza neta ni cambio en el movimiento de la pelota de béisbol. **45.** (a) En ambos isótopos hay 27 protones (consulta la tabla periódica). En el Co-59 hay 32 neutrones, y en el Co-60 hay 33 neutrones. (b) El número de electrones en órbita coincide con el número atómico, 27. **47.** Permanece el núcleo de carbono. **49.** Radón es el resultado. **51.** Para volverse positivo, un átomo pierde un electrón. **53.** Los otros gases inertes son neón, argón, criptón, xenón y radón. **55.** Los protones contribuyen más a la masa de un átomo, y los electrones más al tamaño de un átomo. **57.** Las moléculas de hidrógeno, que tienen menos masa, se mueven más rápido que las moléculas de oxígeno más pesadas. **59.** Respuesta abierta.

### Piensa y discute

**61.** El cuerpo no tendría olor si todas sus moléculas permanecieran en su interior. Un cuerpo tiene olor sólo si algunas de sus moléculas entran en la nariz. **63.** Dado que los átomos de aluminio son menos masivos que los átomos de plomo, en una muestra de 1 kg hay más átomos de aluminio que átomos de plomo. **67.** En realidad tú eres parte de todas las personas que te rodean en el sentido de que estás compuesto de átomos no sólo de todas las personas a tu alrededor, ¡sino también de todas las personas que hayan vivido sobre la Tierra! La afirmación de la pequeña Andrea Wu en la fotografía de inicio de la Parte 2 es indiscutible. Y los átomos que ahora están en ti constituirán la alberca atómica de la que otros se servirán. **69.** Pensaban que una molécula está hecha de un átomo de hidrógeno y un átomo de oxígeno: HO.

## Capítulo 12

### Preguntas conceptuales

**1.** Los átomos están ordenados en una sustancia cristalina, y dispuestos de manera aleatoria en las sustancias no cristalinas. **3.** Una rebanada de pan oprimida tiene un volumen reducido, la misma masa y una densidad aumentada. **5.** El estrecho empaquetamiento de los átomos en el iridio explica su gran

densidad. **7.** Después de que un resorte se deforma, regresa a su forma inicial cuando se elimina la fuerza deformadora. **9.** La ley de Hooke, $F \sim \Delta x$, se aplica a materiales elásticos. **11.** El estiramiento será 3 veces mayor, o 6 cm. **13.** La capa neutra de una viga es la región donde no hay tensión ni comprensión cuando se sostiene una carga; está en la porción media del haz. **15.** Las largas losas horizontales de piedra se fracturan cuando soportan una carga, de modo que las columnas verticales reducen las longitudes de las losas. **17.** No se necesita cemento porque las fuerzas de compresión mantienen unido el arco. **19.** La fuerza depende del área transversal. **21.** El área superficial aumenta por cuatro; el volumen aumenta por ocho. **23.** Un ratón necesita más alimento por peso corporal que un elefante. **25.** Las criaturas pequeñas tienen una área superficial más grande en relación con el peso corporal, y encuentran mayor resistencia del aire en relación con el peso corporal, lo que resulta en una caída más lenta que la de las criaturas más grandes.

### Piensa y realiza

**27.** Observa el área más pequeña con empaquetado estrecho. **29.** La cadena tiene la forma del huevo. ¡Debes intentar esto!

### Piensa y resuelve

**31.** Un metro cúbico de corcho tiene una masa de 400 kg y un peso de alrededor de 4,000 N. Su peso en libras es 400 kg $\times$ 2.2 lb/kg $=$ 88 lb, demasiado pesado para levantarse. **33.** Cuando los resortes se ordenan como en (a), cada resorte soporta la mitad del peso, se estira la mitad (2 cm) y lee 5 N. En la posición (b), cada resorte soporte el peso completo, cada uno se estira 4 cm y cada uno lee 10 N. Ambos resortes se estiran 4 cm, de modo que el peso jala la combinación una distancia total de 8 cm. **35.** El doble de la masa de oro tendría el doble de volumen $= 2\ \text{cm}^3 = L^3 \Rightarrow L = \sqrt[3]{2}\ \text{cm} = 1.26\ \text{cm}$.

### Piensa y clasifica

**37.** C, A, B

### Piensa y explica

**39.** Ambos toman lo mismo porque 1,000 mg $=$ 1 g. **41.** El carbono y parte del oxígeno que constituyen mucha de la masa de un árbol se originan en el $CO_2$ del aire. **43.** La evidencia de la estructura cristalina incluye patrones de difracción simétricos de varios materiales, micrografías como la que muestra el profesor Hubisz en la fotografía de inicio del capítulo, la forma tridimensional de los materiales como el cuarzo, e incluso las perillas de latón de las puertas que se han marcado por el sudor de las manos. **45.** Las densidades son las mismas porque ambas son muestras de hierro. **47.** La densidad de la ballena aumenta. **49.** El agua es más densa, de modo que un litro de agua tiene más masa que un litro de hielo. (Una vez que un litro de agua se congela, su volumen es mayor que 1 litro.) **51.** La parte superior del resorte soporta todo el peso del resorte y se estira más que, por decir, el de en medio, que sostiene sólo la mitad del peso y se estira la mitad. Las partes del resorte hacia la parte inferior sostienen muy poco del peso del resorte y difícilmente se estiran en absoluto. **53.** El lado cóncavo está bajo compresión; el lado convexo está bajo tensión. **55.** El concreto también experimenta una compresión, pero no una tensión. De modo que la barra de acero debe estar en la parte de la losa que esté bajo tensión, la parte superior. **57.** El diseño de la izquierda es mejor porque el peso del agua contra el dique pone compresión sobre el dique. La compresión tiende a apretar entre sí las partes del dique, lo que añadió fuerza como la compresión sobre un arco. El peso del agua pone tensión sobre el dique de la derecha, lo cual tiende a separar las partes del dique. **59.** Escala una viga al doble de sus dimensiones lineales, viga I o de otro tipo, y será cuatro veces más gruesa. Entonces, a lo largo de su sección transversal será cuatro veces más fuerte. Pero será ocho veces más pesada. Cuatro veces la fuerza que soporta ocho veces el peso resulta en una viga sólo la mitad de fuerte que la viga original. Lo mismo es cierto para un puente que se escala por dos. El puente más largo sólo es la mitad de fuerte que el más pequeño. (El diseño de los puentes más largos es distinto del de los pequeños. ¡Para eso se les paga a los arquitectos e ingenieros!) Es interesante, que una de las "dos nuevas ciencias" de Galileo, publicada en 1638, fuera la manera como la fuerza depende del tamaño. **61.** Dado que cada eslabón de una cadena es jalado por sus eslabones vecinos, la tensión en la cadena que cuelga es exactamente paralela a la cadena en cada punto a lo largo de la misma. Si el arco adopta la misma forma, entonces la compresión a todo lo largo del arco será similar: paralela al arco en todo punto. No habrá fuerzas internas que tiendan a doblar el arco. Esta forma es una catenaria, la forma de los arcos modernos como el que adorna la ciudad de St. Louis. **63.** El dulcero necesita hacer menos caramelo para las manzanas más grandes, porque el área superficial es menor por kilogramo. (Esto se aprecia con facilidad si comparas las cáscaras del mismo número de kilogramos de manzanas pequeñas y grandes.) **65.** El área superficial más grande del carbón en forma de polvo asegura que una proporción mucho mayor de átomos de carbono en el carbón esté expuesta al oxígeno en el aire. El resultado es combustión muy rápida. **67.** Un edificio de departamentos tiene menos área por unidad habitable expuesta al clima que una unidad unifamiliar del mismo volumen. El área menor significa menos pérdida de calor por unidad. (Es interesante ver las formas casi cúbicas de los edificios de departamentos en los climas septentrionales: un cubo tiene el área superficial más pequeña para un sólido con lados rectangulares.) **69.** La razón del área (metros cuadrados) con respecto al volumen (metros cúbicos) disminuye. **71.** Hacerse ovillo implica exponer menos área de superficie al ambiente. **73.** Más patata se expone al aceite cuando se rebana delgada que en pedazos más grandes. Por tanto, las patatas delgadas se cocinan más rápido que las gruesas. **75.** Los mitones tienen una área superficial menor que los guantes. Quienquiera que haya fabricado mitones y guantes te dirá que, para hacer guantes, se requiere mucho más material. Las manos en los guantes se enfrían más rápido que las manos en los mitones. Los dedos de las manos y los pies, y las orejas tienen un área superficial desproporcionadamente grande con relación a otras partes del cuerpo y en consecuencia son más proclives a congelación. **77.** El ratón tiene un área superficial más grande en relación con el peso corporal, lo cual significa mayor resistencia del aire en relación con el peso corporal, lo cual significa que su rapidez terminal de caída es menor que la del gorila. **79.** La superficie interior de los pulmones no es lisa sino con forma de esponja. Como resultado, hay una superficie enorme expuesta al aire que se respira. Ésta es una manera como la naturaleza compensa la reducción proporcional del área superficial en cuerpos grandes. De esta forma se recibe una cantidad suficiente de oxígeno vital para la vida. **81.** Las gotas de lluvia grandes caen más rápido que las gotas de lluvia más pequeñas, por la misma razón que los paracaidistas más pesados caen más rápido que los paracaidistas más ligeros. Ambas cosas más grandes tienen un área superficial más pequeña y, por tanto, menos resistencia del aire en relación con sus pesos.

### Piensa y discute

**83.** La densidad tiene que ver no sólo con la masa de los átomos que constituyen un material, pero también con el tamaño de dichos átomos y su "amontonamiento". Los átomos de iridio son más pequeños y se amontonan más estrechamente que los átomos de uranio, por lo que el metal iridio es más denso que el metal uranio aun cuando los átomos de uranio sean más pesados. **85.** Una soga el doble de grueso tiene cuatro veces la sección transversal y, por tanto, es cuatro veces más fuerte. La longitud de la soga no contribuye a su fuerza. (Recuerda el refrán: una cadena sólo es tan fuerte como el más débil de sus eslabones, la fuerza de la cadena tiene que ver con el grosor de los eslabones, no con la longitud de la cadena.) **87.** Conforme un organismo aumenta de tamaño, su área superficial en relación con el tamaño creciente disminuye. Por tanto, un organismo grande, como un ser humano, debe tener un intestino de muchos pliegues para que el área sea suficientemente grande como para digerir el alimento necesario. **89.** Un niño tiene más necesidad porque tiene un área superficial más grande por volumen y en consecuencia pierde desproporcionadamente más agua al aire. **91.** La idea del escalamiento (que una cantidad, como el área, cambia en forma diferente que otra cantidad, como el volumen) va más allá de la geometría. Las reglas que funcionan bien para un sistema de un tamaño pueden ser desastrosas cuando se aplican a un sistema con un tamaño diferente. Las reglas para gobernar una pequeña ciudad pueden no funcionar en absoluto para una ciudad grande. Otros ejemplos quedan a tu consideración. Ésta es una pregunta abierta que puede provocar razonamiento o, mejor aún, discusión.

## Capítulo 13

### Preguntas conceptuales

**1.** Presión es fuerza por área. **3.** La presión del líquido es proporcional a la profundidad y a la densidad de peso. **5.** Las presiones son las mismas a la misma profundidad. **7.** La fuerza de flotación actúa hacia arriba porque hay más fuerza debajo de un objeto gracias a una mayor presión a mayor profundidad. **9.** Ambos volúmenes son iguales. **11.** Un cuerpo sumergido está completamente inmerso, totalmente bajo la superficie. **13.** El volumen del agua desplazada es ½ L. La fuerza de flotación es de 5 N. **15.** Cuando un objeto flota, su fuerza de flotación es igual a su peso. **17.** se hunde; flota; ni se hunde ni flota **19.** No. En el caso de flotación, la fuerza de flotación es igual tanto al peso del objeto como al peso del agua desplazada. **21.** Si la presión en una parte aumenta, el mismo aumento en presión se transmite a todas las partes. **23.** Una esfera tiene el área superficial más pequeña para un volumen dado. **25.** La adhesión es la atracción entre sustancias distintas; la cohesión es la atracción entre sustancias parecidas.

### Piensa y realiza

**27.** Un huevo es más denso que el agua dulce, pero menos denso que el agua salada. **29.** La bola húmeda es jalada por la tensión superficial bajo la superficie cuando el sistema está ingrávido (se suelta). Cuando la lata hace impacto,

la bola sumergida, que es mucho más ligera que el agua que desplaza, es lanzada con gran fuerza fuera del agua. **31.** Los granos de pimienta flotan por la tensión superficial. Cuando la tensión superficial disminuye por la adición de jabón, los granos se hunden. ¡Fascinante!

### Sustituye y listo

**33.** Presión = densidad de peso × profundidad = 10,000 N/m$^3$ × 1 m = 10,000 N/m$^2$ = 10 kPa. **35.** Presión = densidad de peso × profundidad = 10,000 N/m$^3$ × 220 m = 2,200,000 N/m$^2$ = 2,200 kPa.

### Piensa y resuelve

**37.** La fuerza por clavo es 120 libras/600 clavos = 0.2 libras por clavo, bastante tolerable.

**39.** Densidad $= \frac{m}{V} = \frac{12\text{ kg}}{2\text{ L}} = 6\text{ kg/L}$.

(Debido a que en 1 metro cúbico hay 1,000 litros, la densidad puede expresarse en unidades kg/m$^3$.) Densidad $= \frac{6\text{ kg}}{1\text{ L}} \times \frac{1{,}000\text{ L}}{\text{m}^3} = 6{,}000\text{ kg/m}^3$. Esto es seis veces la densidad del agua. **41.** Sí. Primero encuentra la presión. Es densidad de peso × profundidad = (10,000 N/m$^3$)(2 m) = 20,000 N/m$^2$, o 20,000 Pa. Fuerza es presión × área, y 1 cm$^2$ = $10^{-4}$ m$^2$, de modo que $F$ = (20,000 N/m$^2$)($10^{-4}$ m$^2$) = 2 N. Sería más sencillo que el niño ejerciera esta fuerza. Es aproximadamente el peso de una libreta o una pequeña caja de cereal. (Nota: En estos cálculos no se consideró la presión del aire porque su efecto al empujar hacia abajo sobre el agua se cancela por su efecto al empujar desde afuera el agujero contra el agua que se fuga.) **43.** De acuerdo con la Tabla 12.1, la densidad del oro es 19.3 g/cm$^3$. Tu oro tiene una masa de 1,000 gramos, de modo que $= \frac{1{,}000\text{ g}}{V} = 19.3\text{ g/cm}^3$. Al resolver $V$, se tiene $V = \frac{1{,}000\text{ g}}{19.3\text{ g/cm}^3} = 51.8\text{ cm}^3$. **45.** La densidad humana es aproximadamente la misma que la del agua, 1,000 kg/m$^3$. A partir de densidad = $m/V$, se tiene $V = m$/densidad = (100 kg)/(1,000 kg/m$^3$) = 0.1 m$^3$.

### Piensa y clasifica

**47.** C, B, A

### Piensa y explica

**49.** Agua. **51.** La presión de la mujer es considerablemente mayor debido al área de contacto relativamente pequeña del tacón, lo que te lastimaría más. **53.** Hay menos presión con una cama de agua debido a la mayor área de contacto. **55.** Tu cuerpo obtiene más reposo cuando te acuestas que cuando estás sentado o de pie porque el corazón no tiene que bombear sangre hasta las alturas que corresponden a las posiciones de pie o sentado. **57.** Más agua fluirá de un grifo abierto en los pisos inferiores debido a la mayor presión. Dado que la presión depende de la profundidad, un grifo en los pisos inferiores efectivamente está "más profundo" que un grifo en los pisos superiores. La presión en los pisos inferiores es mayor por una cantidad = densidad de peso × profundidad, donde la profundidad es la distancia vertical entre grifos. **59.** (a) El depósito está elevado de modo que produce una presión de agua adecuada en los grifos que atiende. (b) Los aros están más juntos en el fondo porque la presión del agua es mayor en el fondo. Más cerca de la parte superior, la presión del agua no es tan grande, de modo que ahí se necesita menos refuerzo. **61.** Un bloque de aluminio de 1 kilogramo es más grande que un bloque de plomo de 1 kilogramo. Por tanto, el aluminio desplaza más agua. **63.** Mientras más pequeña sea el área de la ventana, menor será la fuerza demoledora del agua sobre ella. **65.** El agua que busca su propio nivel es consecuencia de la presión que depende de la profundidad. En un tubo en U lleno con agua, por ejemplo, el agua de un lado del tubo tiende a empujar el agua hacia arriba en el otro lado hasta que las presiones a la misma profundidad en cada tubo son iguales. Si los niveles de agua no fueran iguales, habría más presión en un nivel dado en el tubo más lleno, lo que movería el agua hasta que los niveles fueran iguales. **67.** La fuerza de flotación es el resultado de diferencias en la presión; si no hay diferencias de presión, no hay fuerza de flotación. Esto puede ilustrarse con el siguiente ejemplo. Una pelota de ping-pong que se empuja bajo la superficie del agua usualmente flotará de vuelta hacia la superficie cuando se suelte. Sin embargo, si el recipiente de agua está en caída libre, una pelota de ping-pong sumergida caerá con el recipiente y no intentará alcanzar la superficie. En este caso no hay fuerza de flotación que actúe sobre la bola porque no hay diferencias de presión: los efectos locales de la gravedad están ausentes. **69.** Un cuerpo flota más alto en un fluido más denso porque no tiene que hundirse tanto para desplazar un peso de fluido igual a su propio peso. Un volumen más pequeño del fluido más denso puede coincidir con el peso del cuerpo en flotación. **71.** El mercurio es más denso (13.6 g/cm$^3$) que el hierro. Un bloque de hierro desplazará su peso y todavía estará parcialmente arriba de la superficie del mercurio. Por tanto, flota en mercurio. En agua se hundirá porque no puede desplazar su peso. **73.** Una montaña principalmente de plomo sería más densa que el manto de la Tierra y se hundiría en él. Adivina dónde está la mayor parte del hierro en el mundo. ¡En el centro de la Tierra! **75.** Cuando el balón se mantiene bajo la superficie, desplaza un mayor peso de agua. **77.** Los objetos pesados pueden hundirse o no, dependiendo de sus densidades (por ejemplo, un tronco pesado flota mientras una roca pequeña se hunde, y un trasatlántico flota mientras que un clip se hunde). Las personas que dicen que los objetos pesados se hunden en realidad se refieren a que los objetos densos se hunden. Ten cuidado de distinguir entre cuán pesado es un objeto y cuán denso es. **79.** La fuerza de flotación permanecerá invariable sobre la roca que se hunde porque desplaza el mismo volumen y peso de agua a cualquier profundidad. **81.** Tú eres comprimible, mientras que una roca no lo es, de modo que cuando te sumerges, la presión del agua tiende a oprimir sobre ti y reduce tu volumen. Esto aumenta tu densidad. (Ten cuidado cuando nades: en aguas poco profundas todavía puedes ser menos denso que el agua y flotar hacia la superficie sin esfuerzo, pero a mayores profundidades puedes ser presionado hasta una densidad mayor que la del agua y tendrás que nadar hacia la superficie.) **83.** La fuerza de flotación no cambia. La fuerza de flotación sobre un objeto que flota siempre es igual al peso de dicho objeto, sin importar cuál sea el fluido. **85.** Cuando el cubo de hielo se funde, el nivel del agua al lado del vaso no cambia (ignora efectos de temperatura). Para ver esto, supón que el cubo de hielo es un cubo de 5 gramos; mientras flota, desplaza 5 gramos de agua. Pero cuando se funde, se convierte en los mismos 5 gramos de agua. Por tanto, el nivel del agua no cambia. Lo mismo ocurre cuando se funde el cubo de hielo con las burbujas de aire. Ya sea que el cubo de hielo sea hueco o sólido, desplaza tanta agua flotando como cuando se funde. Sin embargo, si el cubo de hielo contiene granos de arena pesada, al fundirse el nivel del agua en el borde del vaso se derrama. **87.** Las góndolas pesan lo mismo porque están llenas hasta el borde, y cualquiera sea el peso de un bote que flota, el mismo peso de agua se desplaza cuando el bote entra a la góndola. **89.** Si el agua no se desborda, la lectura en la báscula aumentará por el peso ordinario del pez. Sin embargo, si el acuario está lleno al borde, de modo que un volumen de agua igual al volumen del pez desborda, entonces la lectura no cambiará. Aquí se supone correctamente que el pez y el agua tienen la misma densidad. **91.** Debido a la tensión superficial, que tiende a reducir al mínimo el área superficial de una masa informe de agua, su forma sin gravedad y otras fuerzas de distorsión es una *esfera*, la forma con el área superficial más pequeña para un volumen dado. **93.** Parte de cualquier presión que agregues al agua se transmite hacia los cocodrilos hambrientos vía el principio de Pascal. Si el agua estuviera confinada (esto es, no abierta a la atmósfera) los cocodrilos recibirían cada pedacito de presión que ejercieras. Pero incluso si pudieras deslizarte en el estanque y flotar calladamente sin ejercer presión con las brazadas, tu desplazamiento de agua elevaría el nivel del agua en el estanque. Este aumento tan ligero y el aumento tan ligero en la presión del fondo del estanque son señales siempre bienvenidas para los cocodrilos hambrientos. **95.** En la Figura 13.23, el aumento de presión en el depósito es resultado de la fuerza aplicada distribuida sobre el área del pistón de entrada. Este aumento en la presión se transmite hacia el pistón de salida. Sin embargo, en la Figura 13.22, el aumento de presión lo proporciona la bomba mecánica, que no tiene nada que ver con el área de la interfaz de fluido entre el aire comprimido y el líquido. Muchos dispositivos hidráulicos tienen un solo pistón sobre el cual se ejerce la presión. **97.** Un clip más pesado empujaría más profundo en la superficie del agua, lo que superaría la fuerza pequeña de la tensión superficial, por lo cual se hundiría.

### Piensa y discute

**99.** Se demuestra el concepto de presión. Marshall tiene cuidado de que los trozos sean pequeños y numerosos de modo que su peso se aplique sobre un área de contacto grande. Entonces, el vidrio afilado ofrece presión insuficiente para cortar sus pies. **101.** Desde un punto de vista físico, el evento fue bastante razonable porque la fuerza del océano sobre su dedo habría sido muy pequeña. Esto es así porque la presión sobre su dedo tiene que ver sólo con la profundidad del agua, específicamente la distancia a la que se encuentra la fuga abajo del nivel del mar, no con el peso del océano. Para un ejemplo numérico, consulta el Piensa y resuelve 41. **103.** Usar una manguera de jardín llena de agua como un indicador de elevación es un ejemplo práctico del agua que busca su propio nivel. La superficie del agua en un extremo de la manguera estará a la misma elevación por arriba del nivel del mar que la superficie del agua en el otro extremo de la manguera. **105.** Cuando un barco está vacío, su peso es mínimo y desplaza el mínimo de agua y flota más alto. Transportar cualquier carga aumenta su peso y lo hace flotar más bajo. Un barco flotará igual de bajo si transporta algunas toneladas de espuma de estireno que si transporta el mismo número de toneladas de hierro. De modo

que el barco flota más bajo en el agua cuando está cargado con espuma de estireno que cuando está vacío. Si la espuma de estireno estuviera afuera del barco, por abajo de la línea de flotación, entonces el barco flotaría más alto, como lo haría una persona con un chaleco salvavidas. **107.** El nivel del agua cae. Esto se debe a que el hierro desplaza una mayor cantidad de agua mientras está sostenido que cuando está sumergido. Un objeto que flota desplaza su peso de agua, que es mayor que su propio volumen, mientras que un objeto sumergido desplaza sólo su volumen. (Esto puede ilustrarse en la cocina con un plato que flota en un fregadero lleno de agua. La cubertería en el plato toma el lugar de la limadura de hierro. Observa el nivel del agua al lado del fregadero y luego lanza por la borda la cubertería. El plato flotará más alto y el nivel del agua en el lado del fregadero descenderá. ¿El volumen de la cubertería desplazará suficiente agua para llevar el agua a su punto de partida? No, no en tanto sea más densa que el agua.) **109.** El globo se hundirá hasta el fondo porque su densidad aumenta con la profundidad. El globo es compresible, de modo que el aumento en presión del agua abajo de la superficie lo comprime y reduce su volumen, lo que en consecuencia aumenta su densidad. Su densidad aumenta aún más conforme se hunde más bajo, hacia regiones de mayor presión y compresión. Piensa en la fuerza de flotación: a medida que su volumen se reduce al aumentar la presión conforme desciende, la cantidad de agua que desplaza se vuelve menor. De modo que su fuerza de flotación disminuye a medida que desciende. **111.** Sí, dice la verdad. ¡Pero lo que no te dice es que te ahogarás! Tu chaleco salvavidas se sumergirá y desplazará más agua que la de tus amigos quienes flotan en la superficie. Aunque la fuerza de flotación sobre ti será mayor, ¡tu peso aumentado todavía es mayor! Si te hundes o flotas dependerá de si la fuerza de flotación es o no igual a tu peso. **113.** En ausencia de peso no ocurriría flotación. La flotación depende de las diferencias de presión debidas a diferentes pesos de agua bajo diferentes profundidades de agua. Si no hay diferencias de presión, no hay flotación. En la EEI, la tensión superficial, más que la flotación, dictan el comportamiento de los objetos sumergidos.

## Capítulo 14

### Preguntas conceptuales

**1.** El Sol es la fuente de energía para el movimiento de las moléculas del aire. La gravedad de la Tierra jala las moléculas de aire hacia abajo, lo que evita que la mayoría escape hacia el espacio. **3.** La causa de la presión atmosférica es el peso del aire. **5.** La masa aproximada es de 1 kg, con un peso de 10 N. **7.** Ambas presiones son iguales. **9.** Tendría que ser más alto, porque es 1/13.6 más denso. **11.** La atmósfera puede empujar el agua un máximo de 10.3 m por medio de su presión. **13.** La densidad se duplica cuando el volumen se reduce a la mitad. **15.** Un gas ideal es aquel en el cual las fuerzas intermoleculares y los tamaños de las moléculas pueden ignorarse. **17.** Existe una fuerza de flotación para todos los objetos que desplazan un fluido. **19.** Las líneas de corriente son líneas imaginarias que muestran la trayectoria de un fluido. **21.** Cuando aumenta la rapidez, disminuye la presión interna. **23.** El principio de Bernoulli trata con presiones internas. **25.** El agua con movimiento más rápido entre los barcos resulta en una presión reducida. **27.** El fluido es empujado hacia arriba por la presión de la atmósfera sobre su superficie. **29.** Tres ejemplos son: las señales de neón, las lámparas fluorescentes y ciertas pantallas de televisión.

### Piensa y realiza

**31.** Las presiones deben ser aproximadamente iguales. Las paredes rígidas del neumático impiden que los cálculos de presión sean más exactos. En consecuencia, el valor calculado debe ser un poco mayor. **33.** Tienes una especie de barómetro, pero, debido a que el medio es agua, tendría que alcanzar una columna de 10.3 m de alto para proporcionar la misma presión que una columna de mercurio de 75 cm de alto. **35.** El borboteo se debe al aire que entra al frasco. No ocurriría borboteo si esto de algún modo se intentara en la Luna, donde no hay atmósfera. **37.** Cuando tu dedo cierra la parte superior de la pajilla llena de agua, la presión atmosférica ya no actúa sobre la parte superior del agua, por lo que se levanta con facilidad. Cuando quitas el dedo, el agua se derrama hacia el fondo. Éste es un buen procedimiento para transferir líquidos de un tubo de ensayo a otro. **39.** La presión del agua es menor en la parte que fluye sobre la parte curva de la cuchara, lo que resulta en que dicha parte se mueva hacia el chorro en lugar de alejarse de él.

### Piensa y resuelve

**41.** Para elevar efectivamente (0.25)(80 kg) = 20 kg, la masa de aire desplazado sería de 20 kg. La densidad del aire es aproximadamente 1.2 kg/m$^3$. A partir de densidad = masa/volumen, el volumen de 20 kg de aire, además el volumen del globo (ignorando la masa del helio), sería volumen = masa/densidad = (20 kg)/(1.2 kg/m$^3$) = 17 m$^3$. (Desde luego, conforme aumenta la altitud, el helio en el globo se expande, lo que desplaza mayor volumen de aire, pero aire más delgado, ya que la atmósfera también se vuelve menos densa.)

**43.** A partir de $P = \frac{F}{A}$; $F = PA = (0.04)10^5 \frac{N}{m^2}(100\ m^2) = 4\times10^5$ N.

### Piensa y clasifica

**45.** A, B, C **47.** C, A, B

### Piensa y explica

**49.** No hay atmósfera en la Luna porque la rapidez de una fracción mensurable de moléculas de gas a temperaturas ordinarias excedería la velocidad de escape lunar (debido a la menor gravedad de la Luna). Toda cantidad apreciable de gas se ha fugado hace tiempo y ha dejado a la Luna sin aire. **51.** Si el diámetro se duplicara, el área sería cuatro veces mayor. Para la misma presión, esto significaría cuatro veces más fuerza. **53.** Las crestas cerca de la base del embudo permiten que el aire escape del recipiente donde se inserta. Sin las crestas, el aire en el recipiente se comprimiría y tendería a evitar el llenado conforme suba el nivel del líquido. **55.** La masa de la burbuja no cambia. Su volumen aumenta porque su presión disminuye (ley de Boyle) y su densidad disminuye (misma masa, mayor volumen). **57.** A diferencia del agua, el aire se comprime con facilidad. De hecho, su densidad es proporcional a su presión (a una temperatura dada). De este modo, cerca del suelo, donde la presión es mayor, la densidad del aire es mayor y corresponde a ladrillos más comprimidos. A gran altitud, donde la presión es más baja, la densidad del aire es menor, lo que corresponde a ladrillos menos comprimidos. **59.** Una bomba de vacío perfecto podría bombear agua a una altura no mayor de 10.3 m. Esto es así porque la presión atmosférica que empuja el agua hacia arriba del tubo pesa tanto como 10.3 metros verticales de agua con la misma área transversal. **61.** La altura de la columna en un barómetro de mercurio está determinada por la presión, no por la fuerza. Las presiones de fluido dependen de la densidad y la profundidad: la presión en el fondo de una ancha columna de mercurio no es diferente de la que hay en el fondo de una columna angosta de mercurio con la misma profundidad. El peso del fluido *por área* de contacto es la misma para cada uno. Lo mismo sucede con el aire circundante, lo cual explica por qué los barómetros de tubo ancho muestran la misma altura que los barómetros de tubo angosto. **63.** La altura sería menor. El peso de la columna equilibra el peso de una columna de aire de igual área. El líquido más denso necesitaría menos altura para tener el mismo peso que la columna de mercurio. **65.** Los pulmones de uno, al igual que un globo inflado, se comprimen cuando se sumergen en agua, y el aire en su interior se comprime. El aire no fluirá por sí solo de una región de menor presión a una región de mayor presión. El diafragma en el cuerpo reduce la presión pulmonar para permitir la respiración, pero este límite se lleva a un esfuerzo extremo cuando una persona se sumerge casi 1 m bajo la superficie del agua. Se supera a más de 1 m. **67.** El plomo y las plumas tienen la misma masa. El peso se mide como la fuerza con la cual algo presiona sobre una superficie de apoyo. Cuando la flotabilidad del aire influye, la fuerza neta contra la superficie de apoyo es menor, lo que indica un peso menor. La fuerza de flotación es más apreciable para volúmenes más grandes, como las plumas. De modo que, con menos flotabilidad, la misma masa de plomo pesa más que la misma masa de plumas. **69.** El helio es menos denso que el aire y pesaría menos que un volumen igual de aire. Una botella llena de helio pesaría menos que una botella de aire (si supones que están llenas a la misma presión). Sin embargo, la botella llena de helio pesaría más que la botella vacía. **71.** Un objeto se eleva en el aire sólo cuando la fuerza de flotación supera su peso. Un tanque de acero lleno de cualquier cosa pesa más que el aire que desplaza, de modo que no se eleva. Además, el helio está comprimido en el tanque y no se elevaría aún cuando el peso del tanque fuera cero. Un globo lleno de helio pesa menos que el aire que desplaza y se eleva. **73.** De acuerdo con la ley de Boyle, la presión aumenta a tres veces su presión original. **75.** La presión aumenta, en concordancia con la ley de Boyle. **77.** La forma es la de una catenaria, como el Arco Gateway en St. Louis y la cadena colgante discutida en el Capítulo 12. **79.** La fuerza de la atmósfera en ambos lados de la ventana; la fuerza neta es cero, de modo que las ventanas no suelen romperse bajo el peso de la atmósfera. Sin embargo, en un viento fuerte, la presión se reducirá sobre el lado de la ventana en que sopla el viento (principio de Bernoulli) y las fuerzas ya no se cancelarán. Muchas ventanas son sopladas *hacia afuera* en los vientos fuertes. **81.** Conforme la rapidez del agua aumenta, la presión interna dentro del agua disminuye. **83.** El aire se mueve más rápido sobre la parte superior que gira del *frisbee*, y la presión contra la parte superior se reduce. Un *frisbee*, al igual que una ala, necesita un "ángulo de ataque" para garantizar que el aire que fluye por arriba siga una trayectoria más larga que el aire que fluye bajo él. De modo que hay una diferencia de presiones contra las partes superior e inferior del *frisbee* que produce una sustentación ascendente. **85.** Los espaciamientos de las líneas de corriente en lados opuestos de una pelota que no gira son iguales. Para una pelota que gira, las líneas de corriente están más juntas en el lado donde la rapidez del aire aumenta por la acción del giro. **87.** Una mayor área de ala produce una mayor sustentación, lo cual es importante a rapideces bajas, cuando de otro modo la sustentación sería menor. Los alerones se retraen para reducir el área a rapidez de

crucero, donde un área de ala menor puede proporcionar sustentación igual al peso de la aeronave. **89.** El aire más delgado en los aeropuertos de gran altitud produce menos sustentación para los aviones. Esto significa que los aviones necesitan pistas más largas a fin de lograr mayor rapidez para el despegue. **91.** El principio de Bernoulli es la base. Para el automóvil en movimiento, la presión es menor en el lado del automóvil donde el aire se mueve más rápido: el lado más cercano al camión, lo que resulta en que el automóvil es empujado por la atmósfera hacia el camión. Dentro del convertible, la presión atmosférica es mayor que afuera, y el techo de lona se empuja hacia arriba, hacia la región de menos presión. Lo mismo ocurre con las ventanas del tren, donde el aire interior está en reposo con relación a la ventana y el aire exterior está en movimiento. La presión del aire contra la superficie interior de la ventana es mayor que la presión atmosférica exterior. Cuando la diferencia de presiones es suficientemente grande, la ventana revienta.

### Piensa y discute

**93.** El peso de un camión se distribuye sobre la parte de los neumáticos que hace contacto con el camino. Peso/área superficial = presión, de modo que mientras más grande sea el área superficial, o de manera equivalente, mientras mayor sea el número de neumáticos, mayor puede ser el peso del camión para una presión dada. ¿Cuál presión? La presión ejercida por los neumáticos sobre el camino, lo que se determina por (pero es un poco mayor que) la presión del aire en sus neumáticos. ¿Puedes ver cómo se relaciona esto con el Piensa y realiza 31? **95.** Si el producto está sellado en un empaque hermético a nivel del mar, entonces la presión en el empaque es de aproximadamente 1 atmósfera. La presión de la cabina se reduce un poco en vuelos a gran altura, de modo que la presión en el empaque es mayor que la presión circundante y, por tanto, el empaque revienta. **97.** Estás de acuerdo con tu amigo porque el elefante desplaza mucho más aire que un pequeño globo lleno de helio, o cualquier cosa pequeña. Sin embargo, los *efectos* de las fuerzas de flotación son otra historia. La gran fuerza de flotación sobre el elefante es insignificante en relación con su enorme peso. Sin embargo, la pequeña fuerza de flotación que actúa sobre el globo de poco peso es significativa. **99.** Las lecturas no difieren, si supones que el aire no está comprimido. La bolsa llena de aire es más pesada, pero su flotabilidad se invalida por el peso adicional y la lectura es la misma. La fuerza de flotación es igual al peso del aire desplazado, que es lo mismo que el peso del aire dentro de la bolsa (si las presiones son iguales). **101.** El globo que es libre de expandirse desplazará más aire conforme se eleva que el globo rígido. Por tanto, el globo que tiene libertad para expandirse experimentará mayor fuerza de flotación que el globo que no se expande, y se elevará más alto. Además, conforme el globo rígido se eleva, su volumen constante desplaza volúmenes de aire cada vez más ligeros. **103.** El hábitat giratorio es una centrífuga, y aire más denso se "lanza" hacia la pared exterior. Tal como en la Tierra, la densidad máxima del aire está "a nivel del suelo" y se vuelve menor con la altitud creciente (distancia hacia el centro). La densidad del aire en el hábitat giratorio es menor en la región de $g$ cero, el centro. **105.** De acuerdo con el principio de Bernoulli, cuando un fluido gana rapidez al fluir por una región estrecha, la presión del fluido se reduce. La ganancia en rapidez, la causa, produce presión reducida, el efecto. Pero uno puede argumentar que una presión reducida en un fluido, la causa, producirá un flujo en la dirección de la presión reducida, el efecto. Por ejemplo, si reduces la presión del aire en una tubería con una bomba o cualquier otro medio, el aire vecino correrá hacia la región de presión reducida. En este caso el aumento en rapidez del aire es el resultado, no la causa, de la presión reducida. Causa y efecto están abiertos a interpretación. ¡El principio de Bernoulli es un tema controvertido para muchos físicos!

## Capítulo 15

### Preguntas conceptuales

**1.** El agua se congela a 0°C y 32°F, y hierve a 100°C y 212°F. **3.** La energía cinética traslacional es la energía del movimiento molecular de ida y vuelta. **5.** La condición necesaria es el equilibrio térmico; sólo entonces el termómetro y la cosa que se miden tendrán la misma temperatura. **7.** La energía fluye desde los objetos más calientes a los objetos más fríos. **9.** El calor es energía interna que fluye de las ubicaciones calientes a las frías. No son dos términos para la misma cosa. **11.** Se quema el alimento y luego se mide la energía liberada. **13.** Una caloría es equivalente a 4.19 joules. **15.** La plata se calienta más rápido y por tanto tiene menor capacidad calorífica específica. **17.** Una sustancia que se enfría rápidamente tiene una baja capacidad calorífica específica. **19.** En la corriente del Golfo se transporta energía interna, de las aguas tropicales al Atlántico norte, donde calienta el clima frío. **21.** El agua tiene un efecto moderador: lenta para calentarse y lenta para enfriarse. **23.** La tira se dobla porque sus dos metales tienen diferentes tasas de expansión térmica. **25.** El agua de hielo se contrae con el aumento de temperatura, hasta que alcanza 4°C. **27.** El "aguanieve microscópico" hace al agua menos densa. **29.** El volumen mínimo del agua (y el menos denso) ocurre cuando el agua está a 4°C.

### Piensa y realiza

**31.** Si usas un cacahuate de 0.6 gramos, tu valor debe ser de alrededor de 1,400 calorías, si supones que toda la energía térmica se fue hacia el agua.

### Sustituye y listo

**33.** $Q = cm\Delta T = (1\ \text{cal/g·°C})(300\ \text{g})(30°\text{C} - 22°\text{C}) = 3{,}000\ \text{cal}$.
**35.** $3{,}000\ \text{cal}(4.19\ \text{J/1 cal}) = 12{,}570\ \text{J}$

### Piensa y resuelve

**37.** Cada kg requiere 1 kcal por cada grado de cambio, de modo que 50 kg necesitan 50 kcal por cada grado de cambio. Veinte grados significan $20 \times 50$ kcal, que es 1,000 kcal. Por la fórmula, $Q = cm\Delta T = (1\ \text{cal/g·°C})(50{,}000\ \text{g})(20°\text{C}) = 1{,}000\ \text{kcal}$. Puedes convertir esto a joules sabiendo que 4.19 J = 1 cal. En joules esta cantidad de calor es 4,190 kJ (alrededor de 4,200 kJ). **39.** Si una barra de 1 m de largo se expande 0.6 cm cuando se calienta, entonces una barra del mismo material que sea 100 veces más larga se expandirá 100 veces más: 0.6 cm por cada metro, o 60 cm. (La barra calentada medirá 100.6 m de largo.) **41.** Si una tubería de acero que se ajustara de forma ceñida alrededor del mundo se calentara 1 °C, ¡se sostendría a más o menos 70 m sobre el suelo! La forma más directa de ver esto es considerar el radio de la tubería de 40,000 kilómetros de largo, que es el radio de la Tierra, 6,370 kilómetros. El acero se expandirá 11 partes en un millón por cada °C de aumento en temperatura; el radio, así como la circunferencia, se expandirán por esta fracción. De este modo, 11 millonésimas de 6,370 km = 70 m. ¿No es sorprendente?

### Piensa y clasifica

**43.** C, A, B **45.** C, A, B

### Piensa y explica

**47.** Dado que los grados Celsius son más grandes que los grados Fahrenheit, un aumento de 1°C es más grande; es 9/5 más grande. **49.** Las moléculas de gas se mueven de manera desordenada y con rapideces aleatorias. Continuamente corren unas hacia otras, en ocasiones cediendo energía cinética a las vecinas y en ocasiones recibiendo energía cinética. En esta interacción continua sería estadísticamente imposible para cualquier número grande de moléculas tener la misma rapidez. La temperatura tiene que ver con rapideces promedio. **51.** Una molécula en un gramo de vapor tiene mucho más energía cinética, como lo demuestra su temperatura más alta. **53.** El mercurio debe expandirse más que el vidrio. Si las tasas de expansión fuesen iguales no habría diferentes lecturas para diferentes temperaturas. Todas las temperaturas tendrían la misma lectura. **55.** La rapidez promedio de las moléculas en ambos recipientes es la misma. Hay mayor energía interna en el vaso lleno (doble de materia a la misma temperatura). Más calor se requerirá para aumentar la temperatura del vaso lleno en 1°C; de hecho, el doble. **57.** Aumento de temperatura significa aumento de energía cinética, lo cual significa aumento de la cantidad de movimiento de las moléculas. Dicho de manera simple: conforme la temperatura de un gas confinado aumenta, las moléculas se mueven más rápido y ejercen mayor presión cuando rebotan de las paredes del recipiente. **59.** La sustancia con menor capacidad calorífica específica, el hierro, experimenta mayor cambio en temperatura. **61.** Menos calor específico significa menos tiempo para un cambio de temperatura, y un baño caliente más corto. **63.** Alcohol, porque menos calor específico significa menos inercia térmica y mayor cambio en la temperatura. **65.** El ladrillo se enfriará más rápido y tendrás frío en medio de la noche. Lleva a la cama una bolsa de agua caliente con su mayor calor específico y estarás caliente toda la noche. **67.** El clima de Islandia es moderado por el agua circundante. (El calor debido a la corriente del Golfo también ayuda.) **69.** Conforme el océano en la costa de San Francisco se enfría en el invierno, el calor que pierde (transfiere) calienta la atmósfera con la que tiene contacto. Este aire caliente sopla sobre la línea costera de California y produce un clima relativamente cálido. Si los vientos provinieran del este en lugar del oeste, el clima de San Francisco se enfriaría por los vientos invernales del frío y seco estado de Nevada. El clima se invertiría también en Washington, DC, porque el aire calentado por el enfriamiento del Océano Atlántico soplaría sobre Washington, DC, y produciría un clima más cálido en invierno. **71.** El agua entre 0 y 4°C es una excepción. **73.** Cuando los remaches se enfrían se contraen. Esto aprieta las placas a unir. **75.** Los neumáticos se calientan, lo cual calienta el aire en su interior. Las moléculas en el aire calentado se mueven más rápido, lo cual aumenta la presión del aire en los neumáticos. (Consulta la pregunta 57.) **77.** Enfría el vaso interior y calienta el vaso exterior. Si lo haces al revés, los vasos se pegarán más firmemente (si no es que se rompen). **79.** Si se expandieran de manera diferente, como sucede con materiales distintos, la llave y la cerradura no coincidirían. **81.** Es probable que la fotografía se haya tomado en un día cálido. Si se hubiera tomado en un día frío,

habría más espacio entre los segmentos. **83.** El desbordamiento es el resultado de la gasolina líquida que se expande más que el tanque sólido. **85.** La forma en U absorbe el exceso de expansión o contracción, sin cambiar las posiciones de los puntos finales. **87.** En la construcción de una bombilla, es importante que los conductores metálicos y el vidrio tengan la misma tasa de expansión térmica. Si los conductores metálicos se expanden más que el vidrio, el vidrio puede romperse. Si el metal se expande menos que el vidrio al calentarse, entraría aire por las brechas resultantes. **89.** El agua tiene la densidad más alta a 4°C; por tanto, enfriarse o calentarse a esta temperatura resultará en una expansión del agua. Un pequeño aumento en el nivel del agua sería ambiguo y haría impráctico un termómetro de agua en esta región de temperatura. **91.** El volumen aumenta. **93.** Es importante evitar que el agua se congele en las tuberías porque, cuando la temperatura desciende por debajo de la congelación, el agua se expande cuando se congela y las tuberías (si son de metal) se fracturarán si el agua que contienen se congela. **95.** Si el enfriamiento ocurriera en el fondo de un estanque, todavía se formaría hielo en la superficie, pero transcurriría mucho más tiempo para que el estanque se congelara. Esto se debe a que toda el agua en el estanque tendría que reducirse a una temperatura de 0°C en lugar de 4°C antes de formarse el primer hielo. El hielo que se formara en el fondo, donde ocurre el proceso de enfriamiento, sería menos denso y flotaría hacia la superficie (excepto por el hielo que pudiera formarse alrededor de material anclado al fondo del estanque).

### Piensa y discute

**97.** Sin considerar otros efectos, la temperatura debe ser un poco más alta en el fondo porque la EP del agua arriba se transforma en EC abajo, que a su vez se transforma en calor y energía interna cuando el agua que cae se detiene. (En su luna de miel, James Prescott Joule no podía alejarse de su preocupación por el calor e intentó medir la temperatura del agua arriba y abajo de una cascada en Chamonix. Sin embargo, el aumento de temperatura que él esperaba fue compensado por el enfriamiento debido a evaporación a medida que el agua caía.) **99.** Todas las partes de un anillo metálico se expanden cuando se calienta, no sólo el grosor, sino también las circunferencias exterior e interior. Por tanto, la bola que suele pasar por el agujero cuando las temperaturas son iguales pasará con más facilidad por el agujero expandido cuando el anillo se caliente. (Es muy interesante que el agujero se expanda tanto como un disco del mismo metal que experimenta el mismo aumento de temperatura. Para montar los anillos metálicos en las ruedas de madera de los carruajes, los herreros calentaban primero los bordes. Al enfriarse, la contracción resultaba en un ajuste ceñido.) **101.** El latón se expande y contrae más que el hierro para los mismos cambios en temperatura. Una vez que el hierro se enfría y adquiere su "agarre férreo" sobre el latón, los dos materiales, al ser buenos conductores y estar en contacto mutuo, se calentarán o enfriarán juntos. Si la temperatura aumenta, el hierro se expande, pero el latón se expande todavía más. Ni siquiera enfriándolos será posible separarlos. **103.** En un día caluroso una cinta de acero se expandirá más que el suelo. Medirás terreno con una cinta "estirada". De modo que tus mediciones de un pedazo de terreno serán menores que las mediciones hechas en un día frío. Las mediciones hechas en un día frío mostrarán que el área es más grande. (Si, por otro lado, estás demarcando terreno todavía no lotificado, entonces en un día caliente obtendrás más tierra.) **105.** El volumen combinado de todos los miles de millones de "cuartos abiertos" en los cristales de hielo hexagonales de un trozo de hielo es igual al volumen de la parte de hielo que se extiende por arriba del agua cuando el hielo flota. Cuando el hielo se funde, los espacios abiertos se llenan con la cantidad de hielo que se extiende por arriba del nivel del agua. Es por esto por lo que el nivel del agua no se eleva cuando el hielo en un vaso de agua se funde: el hielo fundido se "hunde" y llena muy bien los espacios abiertos.

## Capítulo 16

### Preguntas conceptuales

**1.** Los electrones "libres" se mueven rápido y transfieren energía a otros electrones que migran a través del material. **3.** La madera es un buen aislante incluso cuando está al rojo vivo; por tanto, muy poca energía térmica se transfiere hacia los pies. **5.** El aislamiento demora la transferencia de calor. **7.** Cuando la molécula de aire es golpeada por una molécula con movimiento rápido, aumenta su rapidez de rebote. **9.** Las rapideces disminuyen con la expansión. **11.** La dirección de los vientos cambia con los cambios de temperatura de la tierra y el agua. El flujo de aire se invierte a medida que se invierten las temperaturas relativas. **13.** Las ondas con frecuencia alta tienen longitudes de onda cortas. **15.** La radiación terrestre es radiación emitida por la superficie de la Tierra. **17.** Las temperaturas no disminuyen de manera continua porque todos los objetos también absorben energía radiante. **19.** Una cazuela negra se calentará más rápido (y se enfriará más rápido) que una cazuela de plata. **21.** La pupila parece negra porque la luz que entra en el ojo por lo general no sale. Sin embargo, con los flashes de las cámaras, algo de ella sale. **23.** Una mala conductividad significa que hay poco calor del suelo y el objeto puede enfriarse mediante radiación hasta temperaturas por debajo de la temperatura del aire circundante. **25.** Sí. La ley de enfriamiento de Newton también se aplica al calentamiento. **27.** El vidrio permite entrar energía radiante de luz visible con frecuencia alta, pero evita que salga energía infrarroja de frecuencia baja vuelta a radiar. Lo mismo ocurre para la atmósfera que actúa como válvula de una vía. **29.** El Sol vierte 1,400 J de energía radiante por segundo por metro cuadrado a la parte superior de la atmósfera terrestre.

### Piensa y realiza

**31.** Esta actividad muestra muy bien que el metal es un buen conductor del calor. Si pones sólo el papel en la flama, alcanza con facilidad la temperatura de ignición y se enciende. Pero esta temperatura de ignición no se alcanza si el papel se enrolla en una barra metálica gruesa que absorbe energía de la flama, y que, por tanto, no absorbe el papel. **33.** Cuéntale a la abuela cómo las nubes vuelven a radiar la energía terrestre de vuelta a la superficie de la Tierra. Abundan ejemplos de todos los objetos que emiten y absorben energía.

### Sustituye y listo

**35.** $Q = cm\Delta T = (1\ \text{cal/g}\cdot°\text{C})(20\ \text{g})(90°\text{C} - 30°\text{C}) = 1{,}200\ \text{cal}$.

### Piensa y resuelve

**37.** El café disminuye 25°C en temperatura en 8 horas. La ley de enfriamiento de Newton indica que su tasa de enfriamiento es proporcional a la diferencia de temperatura. Entonces, cuando la diferencia de temperatura es de la mitad, la tasa de enfriamiento será de la mitad. Por tanto, el café perderá 12.5 grados en otras 8 horas, la mitad que en las primeras 8 horas, y se enfriará de 50°C a 37.5°C. **39.** (a) $Q$ ganado por agua = $Q$ perdido por clavos, de modo que $(cm\Delta T)_{\text{agua}} = (cm\Delta T)_{\text{clavos}}$: $(1.0\ \text{g}\cdot°\text{C})(100\ \text{g})(T - 20°\text{C}) = (0.11\ \text{cal/g}\cdot°\text{C})(100\ \text{g})(40° - T)$, donde $T = 22°\text{C}$. (b) Aunque las masas son iguales, los calores específicos están muy separados; el del hierro es muy bajo y el del agua es increíblemente alto. Se necesita todo el calor que el hierro pueda liberar para elevar el agua unos 2°C.

### Piensa y explica

**41.** Las plumas (y el aire que atrapan) son buenos aislantes y por tanto conducen el calor corporal muy lentamente hacia los alrededores. **43.** El aire a 70°F se siente cómodo principalmente porque es un mal conductor. La piel más caliente es lenta para transferir calor al aire. Sin embargo, el agua es un mejor conductor de calor que el aire, de modo que los cuerpos más calientes transfieren calor más fácilmente al agua. **45.** La energía "fluye" de la temperatura más alta a la más baja, de tu mano al hielo. Es la energía, el calor, que fluye de tu mano lo que produce la sensación de frío. No hay flujo de lo frío a lo caliente; sólo de lo caliente a lo frío. **47.** Si tocas con la lengua un metal muy frío, puede conducirse y eliminarse rápido tanto calor de tu lengua que lleve a la saliva a una temperatura por debajo de cero, donde se congela, lo que pegará la lengua al metal. En el caso de la madera que es relativamente no conductora, mucho menos calor se conduce de la lengua y la congelación no sucede con suficiente rapidez como para que se pegue de modo súbito. **49.** Hay más espacios de aire en los mitones que en los guantes, lo cual calienta más las manos. Además, los dedos dentro de los mitones están juntos, lo que mantiene las manos más calientes. **51.** La conductividad de la madera es relativamente baja cualquiera que sea la temperatura, incluso en la etapa de carbones al rojo vivo. Puedes caminar descalzo con seguridad sobre carbones de madera al rojo vivo si pisas rápidamente, porque muy poco calor se conduce a tus pies. Debido a la mala conductividad de los carbones, la energía del interior de los carbones no sustituye con facilidad la energía que transfiere hacia tus pies. Esto es evidente en el color rojo disminuido de los carbones después de haberlos pisado. Sin embargo, caminar sobre carbones de *hierro* al rojo vivo es otra historia. ¡Esto sería un resonante ay! **53.** La temperatura estará en medio, porque uno disminuye en temperatura y el otro aumenta en temperatura. **55.** Es correcto decir que el aumento en *energía térmica* de un objeto es igual a la reducción en *energía térmica* del otro, no la temperatura. El enunciado es correcto cuando los objetos caliente y tibio son del mismo material y de la misma masa. **57.** Las moléculas de gas con menos masa tienen mayores rapideces promedio. Un vistazo a la tabla periódica muestra que el argón (A = 18) tiene átomos menos masivos que el criptón (A = 36). Los átomos más rápidos son los del argón. Éste es el caso ya sea que los gases estén o no en recipientes separados. **59.** Las moléculas más rápidas con U-235 se difundirán más rápido que las moléculas más lentas con U-238 más pesado. **61.** El humo, como el aire caliente, es menos denso que los alrededores y flota. Se enfría cuando hace contacto con el aire circundante y se vuelve más denso. Cuando su densidad coincide con la del aire circundante, su flotabilidad y su peso se equilibran y se detiene el ascenso. **63.** Tanto la molécula como la pelota de béisbol están bajo la influencia de la gravedad y ambas acelerarán hacia abajo a $g$. Cuando otras moléculas impiden la caída, la aceleración de caída libre $g$ ya no se mantiene. **65.** Debido al alto calor específico del agua, la luz solar

calienta el agua mucho menos de lo que calienta la tierra. Como resultado, el aire se calienta sobre la tierra y se eleva. El aire más frío proveniente de arriba del agua fría toma su lugar y se forman corrientes de convección. Si la tierra y el agua se calentaran igualmente por el Sol, no se establecerían dichas corrientes de convección (ni los vientos que producen). **67.** No. Sin embargo, los ventiladores de techo pueden crear un efecto de "viento frío" que puede hacerte sentir hasta cinco grados más frío. Los ventiladores de techo no reducen la temperatura en la habitación, sino simplemente circulan aire, lo que te hace sentir más frío. **69.** La mezcla se expande cuando se expulsa desde la boquilla y, por tanto, se enfría. A la temperatura de congelación de 0°C, se forma hielo. **71.** Un buen emisor, en virtud del diseño molecular o de cualquier tipo, es también un buen absorbente. Un buen absorbente parece negro porque la radiación que incide sobre él es absorbida, justo lo opuesto de la reflexión. **73.** No. Si los buenos absorbentes no fueran también buenos emisores, entonces no sería posible el equilibrio térmico. Si un buen absorbente sólo absorbiera, entonces su temperatura subiría por arriba de los absorbentes no tan buenos que hubiera en los alrededores. Y si los malos absorbentes fueran buenos emisores, sus temperaturas disminuirían por debajo de la de los mejores absorbentes. **75.** La energía cedida por la roca en la superficie de la Tierra se transfiere a los alrededores casi tan rápido como se genera. Por tanto, no hay acumulación de energía que ocurra en el interior de la Tierra. **77.** Bajo cielos abiertos, el suelo irradia hacia arriba pero el cielo no irradia casi nada de vuelta hacia abajo. Bajo las bancas, la radiación descendente de las bancas reduce la radiación neta proveniente del suelo, lo que resulta en un suelo más caliente, donde es más probable que no se produzca escarcha. **79.** Para una máxima calidez, usa el abrigo de plástico en el exterior y aprovecha el efecto invernadero. **81.** Puesto que el aire caliente se eleva, hay una temperatura más alta en el techo que en las paredes. Con una mayor diferencia en las temperaturas interior y exterior, se necesita un aislamiento más grueso para frenar la transferencia de calor.

### Piensa y discute

**83.** El cobre y el aluminio son mejores conductores que el acero inoxidable y, por tanto, establecen más rápido una temperatura uniforme sobre el fondo del sartén y transfieren calor hacia el interior del utensilio. **85.** La nieve y el hielo del iglú son un mejor aislante que la madera. Estarías más caliente en el iglú que en la choza de madera. **87.** Deberías estar en desacuerdo porque, aunque la mezcla tenga la misma temperatura (es decir, la misma EC por molécula), las moléculas de hidrógeno más ligeras tienen más rapidez que las de nitrógeno más pesadas para la misma EC. **89.** Viajan en corrientes ascendentes "térmicas" de aire. **91.** Kelvins y grados Celsius tienen el mismo tamaño, y aunque las razones de estas dos escalas producirán resultados muy diferentes, las *diferencias* en kelvins y las *diferencias* en grados Celsius serán iguales. Debido a que la ley de enfriamiento de Newton involucra diferencias de temperatura, puede usarse cualquier escala. **93.** Apaga tu calentador y ahorra combustible. Cuando está frío afuera, tu casa pierde calor en forma constante. Cuánto pierde depende del aislamiento y la diferencia entre las temperaturas interior y exterior (ley de enfriamiento de Newton). Mantener una $\Delta T$ alta consume más combustible. Para consumir menos combustible, mantén una $\Delta T$ baja y enciente tu calentador por completo. ¿Se necesitará más combustible para recalentar la casa cuando regreses de lo que se habría necesitado para mantenerla caliente mientras estabas fuera? Absolutamente no. Cuando regresas, estás sustituyendo el calor que perdió la casa a una temperatura promedio por debajo del promedio normal, pero si hubieras dejado el calentador encendido, habrías suministrado más calor, suficiente para compensar el calor perdido por la casa en su parámetro normal de temperatura más alta. (Tal vez tu instructor demuestre esto con la analogía de los baldes de agua con fugas.) **95.** Si la temperatura de la Tierra aumenta, su tasa de radiación aumenta. Y si mucha de esta radiación terrestre adicional se bloquea y la temperatura de la Tierra aumenta más, entonces su tasa de radiación simplemente aumenta aún más. Se establece una nueva temperatura de equilibrio más alta. **97.** Si supones 1.0 kW de energía solar sobre 1 $m^2$ en la superficie de la Tierra, la pregunta es cuántos pies cuadrados hay en un metro cuadrado, que es un poco más que 10 pies cuadrados: 1.0 kW = 1,000 W, de modo que 1,000 W/10 = 100 W, como con una bombilla de 100 W. **99.** En la era industrial, el carbón se quemó para producir la energía que creó la Revolución Industrial. Los plásticos y muchos materiales modernos están hechos a partir de combustibles fósiles, los cuales, a largo plazo, deben resultar ser mucho más valiosos que convertir carbón y petróleo en calor y humo.

## Capítulo 17

### Preguntas conceptuales

**1.** Las cuatro fases comunes de la materia son sólido, líquido, gas y plasma. **3.** La evaporación es el cambio de fase de líquido a gas. **5.** La sublimación es el cambio de fase de sólido a gas directamente. **7.** El vapor contiene más energía que el agua en ebullición a la misma temperatura. **9.** La humedad es una medida de cuánto vapor de agua hay en el aire. La humedad relativa es la razón de cuánta agua hay en el aire con respecto a la mayor cantidad de vapor de agua que puede contener el aire a una temperatura dada. **11.** Conforme el aire se eleva, se enfría y condensa para formar nubes. **13.** Cuando la evaporación ocurre debajo de la superficie de un líquido, se dice que hierve. **15.** La temperatura más alta, no la ebullición, cocina los alimentos más rápido. **17.** Cuando el agua arriba burbujea, la presión en el fondo se reduce, y entonces el agua hierve. **19.** El punto de ebullición del agua se reduce cuando la presión del aire de arriba se reduce. **21.** Aumentar la temperatura significa aumentar el movimiento, lo que significa más posibilidades de separación molecular. **23.** Los iones extraños reducen el número de moléculas de agua en la interfaz entre el hielo y el agua cuando ocurre congelación. **25.** El bloque no se separa en dos piezas porque el agua arriba del alambre se rehiela cuando la presión sobre él se reduce. **27.** Un líquido libera energía cuando cambia a sólido. **29.** Una caloría; 80 calorías; 540 calorías.

### Piensa y realiza

**31.** Un géiser y una cafetera percoladora funcionan con el mismo principio. Las burbujas se forman en el fondo, donde el calor se aplica. **33.** La "lluvia" que ves se parece a la lluvia natural en que la condensación del vapor conduce a gotas de agua. Difiere en que la lluvia natural es resultado del enfriamiento en las nubes de vapor, y no la condensación sobre una superficie fría. **35.** Cuando haces esto, ¡el hielo termina intacto!

### Piensa y resuelve

**37.** (a) 1 kg de hielo a 0°C a agua a 0°C requiere 80 kilocalorías. (b) 1 kg de agua de hielo a 0°C a agua en ebullición a 100°C requiere 100 kilocalorías. (c) 1 kg de agua en ebullición a 100°C a vapor a 100°C requiere 540 kilocalorías. (d) 1 kg de hielo a 0°C a vapor a 100°C requiere (80 + 100 + 540) = 720 kilocalorías, o 720,000 calorías. **39.** Primero, encuentra el número de calorías que 10 g de vapor a 100°C cederán al cambiar a 10 g de agua a 0°C: 10 g de vapor al cambiar a 10 g de agua en ebullición a 100°C liberan 5,400 calorías, 10 g de agua a 100°C que se enfrían a 0°C liberan 1,000 calorías, de modo que están disponibles 6,400 calorías para fundir hielo. $\frac{6{,}400\ \text{cal}}{80\ \text{cal/g}} = 80$ gramos de hielo.

**41.** La cantidad de pérdida de calor por parte del hierro es $Q = cm\Delta T$ = (0.11 cal/g·°C)(50 g)(80°C) = 440 cal. El hierro perderá una cantidad de calor al hielo, $Q = mL$. Por tanto, la masa del hielo fundido será $m = Q/L$ = (440 cal)/(80 cal/g) = 5.5 gramos. **43.** EP = $Q$; $0.5mgh = cm\Delta T$. $\Delta T = 0.5mgh/cm = 0.5gh/c$ = (0.5) (9.8 m/s$^2$)(100 m)/450 J/kg·°C = 1.1°C. La masa se cancela.

### Piensa y clasifica

**45.** A, B, C

### Piensa y explica

**47.** El agua se evapora rápidamente en el aire seco, y obtiene su energía de tu piel, que se enfría. **49.** Cuando soplas sobre un tazón de sopa caliente, aumentas la evaporación neta y su efecto de enfriamiento porque retiras el vapor caliente que tiende a condensarse y reducir la evaporación neta. **51.** La energía que mantiene en operación al pájaro bebedor proviene del Sol, las lámparas o cualquier cosa que caliente la cámara inferior donde tiene lugar la evaporación. Para ver esto, simplemente dirige energía térmica a la cámara inferior del pájaro y verás un aumento en el número de veces por minuto que el pájaro bebe. **53.** No. Un ventilador no enfría la habitación, sino que facilita la evaporación de la transpiración, lo cual enfría el cuerpo. **55.** El cuerpo mantiene su temperatura a unos normales 37°C mediante el proceso de evaporación. Cuando el cuerpo tiende a sobrecalentarse, suda, lo cual enfría el cuerpo si se deja que el sudor se evapore. (Es muy interesante que, si estás sumergido en agua caliente, sudes profusamente, pero no hay evaporación ni enfriamiento, por eso no es recomendable permanecer mucho tiempo en una bañera caliente.) **57.** El aire arriba de la temperatura de congelación es frío en la vecindad de un *iceberg* y la condensación del vapor de agua en el aire resulta en neblina. **59.** En un día cuando el exterior de las ventanas esté más caliente que el interior, ocurre condensación en el exterior de las ventanas. También puedes ver esto en el parabrisas de tu automóvil cuando dirige el acondicionador de aire contra el interior del vidrio. **61.** El aire que se mueve hacia arriba se expande en regiones de menor presión atmosférica. La expansión se acompaña de enfriamiento, lo cual significa que las moléculas se mueven con rapideces tan bajas que producen coalescencia durante las colisiones, de ahí la humedad que conforma la nube. **63.** Conforme la energía potencial molecular se transforma en energía cinética molecular en la condensación, se libera una enorme energía térmica. (La congelación de las gotas para formar hielo agrega aún más energía térmica.) **65.** Conforme las burbujas se elevan, menos presión

se ejerce sobre ellas. **67.** Cuando el frasco alcanza la temperatura de ebullición, no entra más calor en él porque está en equilibrio térmico con el agua circundante a 100°C. Éste es el principio de la "doble ebullición". **69.** No. Los alimentos se cuecen por la temperatura alta a la que están sujetos, no por el burbujeo del agua circundante. Por ejemplo, pon agua a temperatura ambiente en un vacío y hervirá. ¡Pero un huevo en esta agua en ebullición no se cocinará en absoluto! **71.** La humedad del trapo se convierte en vapor y te quema. **73.** El hielo de hecho es frío. ¿Por qué frío? Porque la evaporación rápida del agua enfría el agua hasta el punto de congelación. **75.** El tiempo de cocción no será diferente para el agua que hierve vigorosamente que para el agua que hierve moderadamente, porque ambas tienen la misma temperatura. La razón por la que el espagueti debe cocerse en agua que hierve vigorosamente es tan sólo para garantizar que los espaguetis no se peguen entre sí ni en el sartén. Para ahorrar combustible, sólo revuelve el espagueti en agua que hierve moderadamente. **77.** El punto de ebullición del agua es más alto en un reactor nuclear debido al aumento de presión. El reactor se comporta como una olla de presión. **79.** El agua en el radiador presurizado no hierve, aun cuando su temperatura exceda 100°C (como el agua en una olla de presión). Pero cuando se retira en forma súbita la tapa del radiador, la presión disminuye y el agua a temperatura alta hierve de inmediato. ¡No acerques la cabeza a un radiador caliente cuando le quites la tapa! **81.** La humedad de tu piel se congela a una temperatura por debajo de 0°C sólo porque contiene sal. El hielo muy frío en contacto con tu mano congela la humedad de la piel de tu mano y tienen lugar enlaces entre tu piel y el hielo. Es por esto que está "pegajoso". **83.** Sin duda las nevadas son posibles en días muy fríos. Pero cuando se forma nieve, la temperatura del aire aumenta por el cambio de estado del $H_2O$ de gas a sólido o de líquido a sólido. Por eso uno observa calidez cuando está nevando, y por tanto, uno malinterpreta que no puede haber nevada si está frío. (De igual modo, es un hecho que las orejas siguen creciendo toda la vida. De modo que los ancianos suelen tener orejas grandes. Algunas personas que ven a niños con orejas grandes equivocadamente dicen que están destinados a tener una vida larga.) **85.** El peso del hielo arriba tritura los cristales de hielo en el fondo, lo que forma una capa líquida sobre la cual se desliza el glaciar. **87.** La madera fundirá *más* hielo porque, debido a su gran capacidad calorífica específica, contiene más energía interna. Debido a la menor cantidad de energía interna del metal y a su mayor conductividad, fundirá menos hielo más rápido. **89.** Tus gafas están más frías que el aire adentro, y la condensación del aire en la habitación ocurre sobre tus gafas, otro ejemplo de la Figura 17.8. **91.** El azúcar no se congela con el agua del ponche, de modo que el ponche medio congelado tiene el azúcar de la mezcla original, el doble de la concentración original. **93.** La práctica de enrollar papel alrededor del hielo en una nevera no es aconsejable, a menos que sólo quieras hacer que el hielo dure más tiempo a costa de reducir el efecto de enfriamiento. El periódico aislante retarda el proceso de fundido, lo cual disminuye la extracción de calor de los alrededores. Los alrededores se enfrían principalmente porque el hielo se funde. Inhibir esta fusión es reducir el proceso de enfriamiento deseado. **95.** Cada gramo de agua que experimenta congelación libera 80 calorías de energía térmica al sótano de enlatados. Esta liberación continua de energía por el agua en congelación impide que la temperatura del sótano descienda por debajo de 0°C. El azúcar y las sales de los alimentos enlatados impiden que se congelen a 0°C. Sólo cuando toda el agua en la tina se congele, la temperatura del sótano descenderá por debajo de 0°C y entonces congelará los alimentos enlatados. Por tanto, el granjero debe sustituir la tina en cuanto toda el agua se haya congelado. **97.** En ambos modos de operación, una bomba térmica mueve calor de un lugar frío a uno caliente. **99.** Respuesta abierta.

### Piensa y discute

**101.** Cuando un dedo húmedo se sostiene al viento, la evaporación es mayor sobre el lado ventoso, por lo cual se siente frío. El lado frío de tu dedo está a favor del viento. **103.** En este caso hipotético, la evaporación no enfriaría el líquido restante porque la energía de las moléculas salientes no sería diferente de la energía de las moléculas que quedaran. Aunque la energía interna del líquido disminuiría con la evaporación, la energía por molécula no cambiaría. No ocurriría un cambio de temperatura en el líquido. (Por otra parte, en este caso hipotético, el aire circundante se enfriaría. Las moléculas que se alejan de la superficie del líquido serían frenadas por la fuerza de atracción del líquido que actúa sobre ellas.) **105.** Puedes agregar calor sin cambiar la temperatura cuando la sustancia experimenta un cambio de fase. **107.** Puedes extraer calor sin cambiar la temperatura cuando la sustancia experimenta un cambio de fase. **109.** El gas predominante en una burbuja de agua hirviendo es $H_2O$. ¿Creíste que ésta era una pregunta capciosa?

## Capítulo 18

### Preguntas conceptuales

**1.** El significado es "movimiento de calor". **3.** El volumen disminuye en 1/273 por cada 1°C de cambio de temperatura. **5.** El volumen se aproxima a 0. **7.** La principal preocupación son los cambios de energía. **9.** Un sistema es un grupo bien definido de átomos, moléculas u objetos. **11.** Cuando se realiza trabajo sobre un sistema, aumentan tanto la energía interna como la temperatura. **13.** La energía térmica aumenta cuando se realiza trabajo sobre el sistema; disminuye cuando el sistema realiza trabajo. **15.** La temperatura del aire aumenta (o desciende) conforme la presión aumenta (o disminuye). **17.** Una inversión de temperatura es una condición en la cual las regiones superiores de aire son más calientes que las regiones más bajas. **19.** El calor por sí mismo nunca fluye de un objeto frío a uno caliente. **21.** La contaminación térmica es un calor expulsado que es indeseable. **23.** La condensación reduce la presión sobre la parte posterior de los álabes de una turbina, lo que permite una fuerza neta para girarlas mientras el agua se recicla. **25.** La energía de alta calidad tiende a transformarse en energía de menor calidad. **27.** Una medida del desorden se llama entropía. **29.** Ningún sistema puede tener su temperatura absoluta reducida a cero.

### Piensa y realiza

**31.** Sí, ocurre un colapso, pero no es tan violento como cuando en el plato usas agua caliente.

### Sustituye y listo

**33.** Eficiencia ideal $= \dfrac{T_{\text{caliente}} - T_{\text{fría}}}{T_{\text{caliente}}} = (3{,}000\ \text{K} - 300\ \text{K})/3{,}000\ \text{K} = 90\%.$

### Piensa y resuelve

**35.** Al convertir a temperaturas absolutas, se tiene 600°C = 273 + 600 = 873 K; 320°C = 273 + 320 = 593 K. Entonces la eficiencia ideal es (873 − 593)/873 = 0.32, o 32%. Si en la ecuación se usan valores Celsius, resultaría en un 47% incorrecto. ¡No es así! **37.** Si por "el doble de frío" ella entiende la mitad de la temperatura absoluta, entonces la temperatura sería (1/2)(273 + 10) = 141.5 K. Para encontrar cuántos grados Celsius bajo 0°C es esto, primero resta 141.5 K de 273 K; esto es 273 K − 141.5 K = 131.5 K abajo del punto de congelación del hielo, o −131.5°C (o, simplemente, 141.5 K − 273 K = −131.5°C). ¡*Muy* frío! **39.** (a) El error de Wally fue no convertir a kelvins: 300°C = 273 + 300 = 573 K, y 25°C = 273 + 25 = 298 K. (b) Entonces la eficiencia máxima es (573 K − 298 K)/573 K = 0.48, o 48%. **41.** El trabajo que realiza el martillo sobre el clavo es $F \times d$, y el cambio de temperatura del clavo puede encontrarse a partir de $Q = cm\Delta T$. Primero, pon todo en las unidades convenientes para calcular: 6.0 g = 0.006 kg; 8.0 cm = 0.08 m. Entonces $F \times d$ = 600 N × 0.08 m = 48 J, y 48 J = (0.006 kg)(450 J/kg·°C)($\Delta T$), que puede resolverse para obtener $\Delta T$ = 48 J/(0.006 kg × 450 J/kg·°C) = 17.8°C. (Observarás un efecto similar cuando retires un clavo de un trozo de madera. El clavo que saques estará muy caliente.)

### Piensa y explica

**43.** En el caso del horno a 500 grados, hace mucha diferencia: 500 kelvins es 227°C, muy diferente que 500°C. Pero en el caso de la estrella de 50,000 grados, el incremento de 273 de cualquier forma casi no hace diferencia. Sea que le des o le quites 273, la estrella todavía es de 50,000 K, o 50,000°C cuando redondeas. **45.** Usualmente no. Experimentan el mismo cambio en *energía térmica*, que se traduce al mismo cambio de temperatura cuando ambos objetos tienen la misma masa y están compuestos del mismo material. **47.** Sí. Tú realizas trabajo sobre el líquido cuando lo agitas vigorosamente, lo cual aumenta su energía interna. Esto se observa por un aumento de la temperatura. (A mediados del siglo XIX, James Joule, al medir la temperatura de un líquido antes y después de realizar un trabajo conocido con un agitador, reveló lo que él llamó "el equivalente mecánico del calor", un descubrimiento que condujo a la ley general de conservación de la energía.) **49.** El cambio de energía interna es 100 J – 80 J = 20 J. **51.** Tú comprimes aire cuando inflas un globo, lo que en consecuencia calienta el globo. **53.** El aire se calienta porque se comprime de manera adiabática. **55.** La energía solar es la fuente final de energía. **57.** En concordancia con la ecuación de Carnot, la eficiencia es mayor con una mayor diferencia de temperaturas entre la fuente de calor (cámara de combustión en el motor) y el sumidero (aire que rodea el escape). Además, bajar la temperatura del ambiente aumenta la eficiencia ideal. **59.** Sólo si el sumidero estuviera a cero absoluto (0 K) una máquina térmica tendría una eficiencia ideal de 100%. **61.** No. En este caso el sumidero de calor también está en la habitación. Es por esto por lo que las bobinas de condensación están en una región *afuera* de la región que se va a enfriar. La temperatura de la habitación en realidad aumenta porque el motor del refrigerador calienta el aire circundante. **63.** Tú *te* enfrías por el ventilador, que sopla aire sobre ti para aumentar la tasa de evaporación de tu piel, pero eres una parte pequeña del sistema global, que se calienta. **65.** No viola la segunda ley de la termodinámica porque un agente externo realiza trabajo sobre el sistema. **67.** Tú sí realizas trabajo al comprimir el gas, lo que aumenta la energía interna. **69.** El pájaro hace lo que las máquinas térmicas: convierte energía de un tipo (solar) en energía mecánica (el balanceo del pájaro).

**71.** La energía total del Universo tiende hacia la indisponibilidad con el tiempo. Las cosas más calientes se enfrían mientras las cosas frías se calientan. Si esto es cierto, el Universo tiende hacia una temperatura común, la llamada "muerte térmica", cuando la energía ya no puede realizar trabajo. (Pero no se sabe con seguridad si las leyes de la termodinámica se aplican al Universo en su totalidad, pues no se entiende la fuente última del vasto remolino energético que ahora es aparente en todo el Universo. ¡La naturaleza puede tener algunas sorpresas!) **73.** Las parcelas adiabáticas ocurren tanto en la atmósfera como en el océano. **75.** Hay más formas en que las moléculas en la fase líquida pueden moverse, lo que resulta en un movimiento más aleatorio y caótico. **77.** No. La congelación del agua no es una excepción al principio de entropía porque se ha puesto trabajo en el sistema de refrigeración para provocar este cambio de estado. En realidad hay un mayor desorden neto cuando se considera el ambiente que rodea al refrigerador. **79.** Dichas máquinas violan al menos la segunda ley de la termodinámica, y la primera ley también. Estas leyes están tan bien sustentadas por tantos experimentos durante tanto tiempo que la Oficina de Patentes prudentemente supone que hay un error en el aclamado invento y no en las leyes de la termodinámica.

### Piensa y discute

**81.** No. La energía interna, a diferencia de la temperatura, no es una cantidad promedio. **83.** Una brisa en un día caluroso reduce el grosor de esta cobija térmica, e incluso la elimina, lo que es seguido por sobrecalentamiento del cuerpo. El resultado inverso ocurre en un día frío, cuando tu piel se siente más fría como resultado de la brisa. **85.** Decir que un lugar es el doble de cálido que otro es decir que las temperaturas dadas son temperaturas absolutas. Una temperatura en Boston de 40°F es aproximadamente 4°C, que es 277 K. El doble de 277 K es 554 K, que es 281°C, que es más alto que 500°F. ¡De modo que un día de 80°F en Florida no es el doble de cálido que un día de 40°C en Boston! **87.** El término *contaminación* se refiere a un subproducto indeseable de algún proceso. Lo deseable o indeseable de un subproducto particular es relativo y depende de las circunstancias. Por ejemplo, usar calor de desecho de una planta eléctrica para calentar una alberca podría ser deseable, mientras que usar el mismo calor para calentar un arroyo de truchas podría ser indeseable. **89.** No. Parte de la energía eléctrica que se usa en encender una lámpara se transfiere por conducción y convección al aire, parte se radia con longitudes de onda invisibles ("radiación térmica") y se convierte en energía interna cuando se absorbe, y parte aparece como luz. Muy poca energía se convierte en luz en una lámpara incandescente, y un poco más se convierte en una lámpara fluorescente. Incluso entonces, toda la energía que toma forma de luz se convierte en energía interna cuando la luz es absorbida por los materiales sobre los cuales incide. De este modo, por la primera ley, toda la energía eléctrica a final de cuentas se convierte en energía interna. Por la segunda ley, la energía eléctrica organizada degenera a la forma más desorganizada, energía interna. Las leyes de la termodinámica no se violan. **91.** Una máquina de movimiento perpetuo sólo funcionaría si no hubiera fricción, fricción *cero*. En la práctica, en el mundo a gran escala, siempre hay fricción, de modo que el movimiento perpetuo necesitaría que la energía aumentara, lo que viola el principio de conservación de la energía. Por otra parte, los átomos y las moléculas están en continuo movimiento perpetuo, y rebotan elásticamente unos contra otros, de modo que no disipan energía ni "se agotan". **93.** (a) Sí, muy probablemente. Dos caras saldrían en promedio 1 lanzamiento de cada 4. (b) No es probable. La posibilidad de que las diez monedas salgan todas cara es sólo de 1 en 1,000. (c) Extremadamente improbable, incluso con una vida de intentos. Las leyes de la termodinámica se basan en estadísticas de grandes números.

## Capítulo 19

### Preguntas conceptuales

**1.** Un meneo en el tiempo es una vibración; un meneo en el espacio y en el tiempo es una onda. **3.** El periodo es el tiempo para un balanceo completo de ida y vuelta. **5.** Una curva sinusoidal es una representación pictórica de una onda. **7.** Hay 101.7 millones de vibraciones por segundo. **9.** La energía se mueve desde la fuente al receptor. **11.** En una onda transversal, las vibraciones son perpendiculares a la dirección de viaje de la onda. **13.** La longitud de onda de una onda longitudinal es la distancia entre compresiones o rarefacciones sucesivas. **15.** Cuando más de una onda ocupa el mismo espacio al mismo tiempo, los desplazamientos se suman en cada punto. **17.** Todas las ondas pueden mostrar interferencia. **19.** Las ondas estacionarias pueden formarse tanto de ondas transversales como de longitudinales. **21.** El efecto Doppler puede observarse tanto con ondas transversales como con longitudinales. **23.** Para continuar con las ondas producidas, el bicho debe nadar a la rapidez de la onda; para producir una onda de proa el bicho debe nadar más rápido que la rapidez de la onda. **25.** Mientras más rápida sea la fuente, más estrecha será la forma en V. **27.** Falso. El avión pudo haber superado la rapidez del sonido antes.

### Piensa y realiza

**29.** ¡Una actividad que hay que realizar! **31.** Respuesta abierta.

### Sustituye y listo

**33.** Al usar $T = 1/f$, se tiene (a) 0.10 s, (b) 5 s, (c) 1/60 s. **35.** $v = f\lambda =$ (200 Hz)(1.7 m) = 340 m/s.

### Piensa y resuelve

**37.** (a) Frecuencia = 2 subidas y bajadas/segundo = 2 hertz. (b) Periodo = $1/f$ = ½ segundo. (c) Amplitud es la distancia desde la posición de equilibrio hasta el desplazamiento máximo: la mitad de la distancia pico a pico de 20 cm, o 10 cm. **39.** (a) Periodo = 1/frecuencia = 1/(256 Hz) = 0.00391 s, o 3.91 ms. (b) Rapidez = longitud de onda × frecuencia, de modo que longitud de onda = rapidez/frecuencia = (340 m/s)/(256 Hz) = 1.33 m. **41.** $T = (75\text{ s})/(15\text{ balanceos}) = 5.0\text{ s}$. A partir de $T = 2\pi\sqrt{L/g}$, $g = 4\pi^2 L/T^2 = 4\pi^2(1.00\text{ m})/(5\text{ s})^2 = 1.6\text{ m/s}^2$.

### Piensa y clasifica

**43.** A, B, D, C **45.** A, C, B

### Piensa y explica

**47.** Un péndulo más corto se balancea de ida y vuelta con una frecuencia mayor y un periodo más corto. **49.** Si supones que el centro de gravedad del maletín no cambia cuando se carga con libros, la tasa de péndulo del maletín vacío y del maletín cargado sería la misma. Esto es así porque el periodo de un péndulo es independiente de la masa. Debido a que la longitud del péndulo no cambia, la frecuencia, y por tanto el periodo, no cambiarían. **51.** El periodo aumenta porque periodo y frecuencia son recíprocos entre sí. **53.** La longitud de onda se alarga al doble. La rapidez y la frecuencia son directamente proporcionales. **55.** Los periodos son iguales. Es interesante que una visión lateral de un cuerpo que se mueve en movimiento circular uniforme se vea que vibra en línea recta. ¿Cómo? Exactamente con movimiento armónico simple. De modo que el movimiento hacia arriba y hacia abajo de los pistones en el motor de un automóvil es armónico simple y tienen el mismo periodo que el cigüeñal que impulsan y gira de manera circular. **57.** La frecuencia de onda y la frecuencia de sacudida son iguales. Esta igualdad no depende del tipo de onda, porque la frecuencia de todas las ondas es la misma que la frecuencia de la fuente vibratoria. **59.** Para producir una onda transversal con un *Slinky*, sacúdelo de ida y vuelta en una dirección que sea perpendicular a la longitud del *Slinky*. Para producir una onda longitudinal, sacúdelo de ida y vuelta a lo largo de la dirección de su longitud, de modo que se produzca una serie de compresiones y rarefacciones. **61.** La luz violeta tiene la frecuencia más alta. **63.** La frecuencia del segundero de un reloj es de un ciclo por minuto; la frecuencia del minutero es de un ciclo por hora; para la manecilla horaria la frecuencia es de un ciclo por 12 horas. Para expresar estos valores en hertz, es necesario convertir los tiempos a segundos. Entonces se encuentra para el segundero la frecuencia = 1/60 hertz, para el minutero la frecuencia = 1/3,600 hertz, y para la horaria la frecuencia = 1/(12 × 3,600) = 1/(43,200) hertz. **65.** La frecuencia de vibración y el número de ondas que pasan por cada segundo son iguales. **67.** Para ondas mecánicas, la fuente es algo que vibra. Para ondas electromagnéticas, la fuente son cargas eléctricas que vibran. **69.** La energía de una ola se dispersa a lo largo de la circunferencia creciente de la onda hasta que su magnitud disminuye hasta un valor que no puede distinguirse de los movimientos térmicos en el agua. La energía de las ondas se suma a la energía interna del agua. **71.** La rapidez de la luz es 300,000 km/s, aproximadamente un millón de veces más rápido que el sonido. Debido a esta diferencia en rapideces, el relámpago se ve un millón de veces más pronto de lo que se escucha. **73.** La frecuencia se duplica. **75.** (a) La frecuencia aumenta. (b) La longitud de onda disminuye. (c) La rapidez no cambia (porque el aire permanece sin movimiento con relación a ti). **77.** No. Los efectos de ondas más cortas y más estiradas se cancelarán entre sí. **79.** La policía usa ondas de radar que se reflejan de los automóviles en movimiento. A partir del corrimiento en las frecuencias regresadas, se determina la rapidez de los reflectores (cuerpos de los automóviles). **81.** La onda de proa o de choque en realidad es la superposición de muchas ondas de menor amplitud que interfieren constructivamente. Cuando la cresta de una onda se traslapa con la cresta de otra, y luego otra, se produce una onda de mayor amplitud. **83.** Una onda de choque, y el resultante estampido sónico, se producen siempre que un avión es supersónico, ya sea que el avión acabe de convertirse en supersónico o que lo haya sido durante horas. **85.** Sí. Un pez supersónico en agua produciría una onda de choque y, por tanto, un estampido sónico por la misma razón que lo haría si viajara más rápido que el sonido en el aire. **87.** Respuesta abierta.

### Piensa y discute

**89.** La frecuencia de un péndulo depende de la fuerza restauradora, que es la gravedad. De igual modo, la masa no afecta la aceleración de la caída libre, como

se demuestra en la Figura 19.1. **91.** Es importante observar que la rapidez de la onda involucra la tasa de viaje mientras que la frecuencia de la onda tiene que ver con la frecuencia de la vibración. ¡Dos conceptos diferentes! **93.** El hecho de que escuches un avión en una dirección que difiere de dónde lo ves tan sólo significa que el avión está en movimiento, y no necesariamente que sea más rápido que el sonido (un estampido sónico sería evidencia de un vuelo supersónico). Si la rapidez del sonido y la rapidez de la luz fuesen iguales, entonces escucharías un avión donde aparece en el cielo. Pero, dado que las dos rapideces son tan diferentes, el avión que ves aparece adelante del avión que escuchas.

### Capítulo 20

#### Preguntas conceptuales

**1.** El sonido es una forma de energía. **3.** Un joven generalmente puede escuchar de 20 a 20,000 hertz. **5.** El aire es un peor conductor que los sólidos y líquidos. **7.** Una compresión es una región de aire comprimido; una rarefacción es una región de aire a presión baja. **9.** La rapidez del sonido depende de las condiciones del viento, la temperatura y la humedad del aire. No depende de la sonoridad o la frecuencia del sonido. **11.** El sonido viaja más rápido en aire caliente. **13.** La energía sonora se disipa en energía térmica. **15.** Una reverberación es sonido reflejado múltiples veces. **17.** El sonido se dobla hacia abajo cuando su rapidez es menor cerca del suelo. **19.** El ultrasonido es un sonido compuesto de frecuencias más altas que el campo auditivo humano. **21.** La elasticidad, tamaño y forma de un objeto determinan su frecuencia natural. **23.** Al sintonizar el radio a cierta frecuencia, ajustas el circuito receptor para que vibre sólo a la frecuencia de la estación. **25.** Las ondas se cancelan cuando son idénticas y están fuera de fase. **27.** El resultado es la cancelación del sonido. **29.** Ocurrirá una frecuencia de batimiento de 4 Hz.

#### Piensa y realiza

**31.** El sonido debe ser más fuerte bajo el agua. La resonancia en la tina puede ser divertida.

#### Piensa y resuelve

**33.** longitud de onda = rapidez/frecuencia

$$= \frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ Hz}} = 1 \text{ m}.$$

De igual modo para una onda de 34,000 hertz,

$$\text{longitud de onda} = \frac{340 \text{ m/s}}{34{,}000 \text{ Hz}} = 0.01 \text{ m} = 1 \text{ cm}.$$

**35.** El fondo marino está 4,590 metros abajo. La demora temporal de 6.0 segundos significa que el sonido llega al fondo en 3.0 segundos. Distancia = rapidez × tiempo = 1,530 m/s × 3.0 s = 4,590 m. **37.** El sonido final que escuchas después de ver que Sally deja de martillar se originó con el último golpe que viste. El primer sonido habría aparecido como un silencio, y los sonidos sucesivos estaban sincronizados con golpes sucesivos. En 1 segundo el sonido viaja 340 metros en aire, la distancia entre tú y Sally. **39.** Existen tres posibilidades de frecuencias de batimiento: 2 Hz, 3 Hz y 5 Hz. Éstas son las diferencias en las frecuencias de diapasón: 261 − 259 = 2 Hz, 261 − 256 = 5 Hz y 259 − 256 = 3 Hz.

#### Piensa y clasifica

**41.** B, C, A

#### Piensa y explica

**43.** La luz viaja aproximadamente un millón de veces más rápido que el sonido, es por ello la demora entre lo que ves y lo que escuchas. **45.** Entre la Tierra y otros planetas hay vacío, y el sonido no viaja en el vacío. **47.** Las abejas zumban cuando vuelan porque baten sus alas a frecuencias audibles. **49.** La frecuencia portadora de las ondas electromagnéticas emitidas por la estación de radio es 101.1 MHz. **51.** La longitud de onda del sonido proveniente de la fuente A es la mitad de la longitud de onda del sonido proveniente de la fuente B. **53.** La luz viaja aproximadamente un millón de veces más rápido que el sonido en el aire, de modo que tú ves un evento distante un millón de veces más pronto de lo que lo escuchas. **55.** Cuando el sonido pasa por un punto particular en el aire, el aire primero se comprime y después se rarifica conforme pasa el sonido. De modo que su densidad aumenta y luego disminuye conforme la onda pasa. **57.** Puesto que la nieve es un buen absorbente del sonido, refleja poco sonido, de ahí el silencio. **59.** La Luna es silenciosa porque no tiene atmósfera que transmita sonidos. **61.** Si la frecuencia del sonido se duplica, su rapidez no cambiará en absoluto, pero su longitud de onda se "comprimirá" a la mitad. La rapidez del sonido sólo depende del medio por el cual viaja, no de su frecuencia, su longitud de onda o de su intensidad (hasta que la intensidad se hace tan grande que resulta una onda de choque). **63.** No. La refracción es resultado del cambio en las rapideces de onda, donde parte de la onda viaja con una rapidez diferente que otras partes. Esto ocurre en vientos no uniformes y temperaturas no uniformes. Es interesante que si los vientos, las temperaturas u otros factores no pudieran cambiar la rapidez del sonido, entonces no habría refracción. (El hecho de que la refracción en verdad ocurra es evidencia de que la rapidez del sonido cambia.) **65.** El sonido se escucha con más facilidad cuando el viento que viaja hacia el escucha a elevaciones por arriba del nivel del suelo viaja más rápido que el viento cerca del suelo. Entonces las ondas se doblan hacia abajo como es el caso de la refracción del sonido que se muestra en la Figura 20.9. **67.** Un eco es más débil que el sonido original porque el sonido se dispersa y, por tanto, es menos intenso con la distancia. Si estás en la fuente, el eco sonará como si se originara en el otro lado de la pared desde la cual se refleja (tal como tu imagen en un espejo parece provenir desde atrás del vidrio). Además, es probable que la pared no sea un reflector perfecto. **69.** Primero, en el espacio exterior no hay aire u otro material para transportar sonido. Segundo, si existiera, la luz que se mueve más rápido llegaría a ti antes que el sonido. **71.** Los soldados rompen el paso cuando cruzan un puente para no ponerlo en vibración o en resonancia forzada, lo cual podría derrumbar el puente. **73.** De acuerdo con la rapidez del sonido, mas no con la frecuencia. La frecuencia del sonido sólo depende de la vibración de la fuente en sí, no del medio. **75.** Las cuerdas inferiores resuenan con las cuerdas superiores. **77.** Estos dispositivos que cancelan el ruido usan interferencia para cancelar el sonido del martillo neumático en los oídos de su operador. Debido al bajo ruido del martillo neumático resultante en los oídos del operador, él puede escuchar tu voz claramente. Sin embargo, tú, sin los audífonos, no experimentas tal cancelación de sonido, de modo que la voz del operador es ahogada por el intenso ruido del martillo neumático. **79.** El vidrio se quiebra debido a la resonancia, cuando la acumulación de vibraciones en el vidrio supera el punto de rompimiento del mismo. **81.** No. La misma palabra en inglés se refiere a diferentes aspectos de la música. El *beat* (compás) de la música involucra el ritmo, y los batimientos (*beats*) involucran pulsaciones debidas a interferencia. **83.** El afinador de piano debe aflojar la cuerda del piano. Cuando escucha primero 3 batimientos por segundo, el afinador sabe que está 3 hertz fuera de la frecuencia correcta. Pero esto podría estar 3 hertz arriba o 3 hertz abajo. Cuando aprieta la cuerda y aumenta su frecuencia, una menor frecuencia de batimiento le habría indicado que estaba en la vía correcta. Cuando no hay frecuencia de batimiento, las frecuencias coinciden. **85.** Escucharás sonido a una frecuencia de 2 kHz, la frecuencia de batimiento de las dos frecuencias superiores.

#### Piensa y discute

**87.** El sonido viaja más rápido en aire húmedo porque las moléculas de vapor de agua menos masivas, $H_2O$, viajan más rápido que las moléculas más masivas de $N_2$ y $O_2$ a la misma temperatura. Este movimiento más rápido resulta en que el sonido viaja más rápido. **89.** La regla es correcta. La rapidez del sonido en el aire (340 m/s) puede redondearse a ⅓ km/s. Entonces, a partir de distancia = rapidez × tiempo, se tiene distancia = ⅓ km/s × (número de segundos). Observa que el tiempo en segundos dividido entre 3 produce el mismo valor. **91.** Las ondas largas se cancelan más, lo cual hace al sonido resultante tan metálico. Por ejemplo, cuando los conos de las bocinas están, por decir, separados 4 centímetros, las ondas con más de 1 metro de largo están casi 180° fuera de fase, mientras que las ondas de 2 centímetros están en fase. Las frecuencias más altas se cancelan menos con este procedimiento. Debes intentar esto para apreciarlo.

### Capítulo 21

#### Preguntas conceptuales

**1.** La música está compuesta de notas periódicas; el ruido es irregular. **3.** Las notas con altura alta tienen frecuencias altas. **5.** Un decibel es una medida de intensidad sonora. **7.** Un sonido de 30 dB es 1,000 veces más intenso que el umbral de audición. **9.** Los sonidos más sonoros que uno puede tolerar tienen intensidades un billón de veces mayores que los sonidos más débiles. **11.** La frecuencia del segundo armónico es el doble, o 400 Hz. **13.** La calidad musical está determinada por la variedad de tonos parciales. **15.** Las tres clases son cuerdas vibratorias, columnas de aire vibratorias y percusiones. **17.** Fourier descubrió que las ondas complejas pueden descomponerse en ondas sinusoidales simples que se suman. **19.** Los fonógrafos capturan el sonido de forma analógica, los CD de forma digital.

#### Piensa y realiza

**21.** ¡Primero consigue un reloj que haga tictac! **23.** ¡Esta actividad puede ser interesante!

#### Piensa y resuelve

**25.** Periodo = $1/f$ = 1/440 segundos (0.0023 s, o 2.3 ms). **27.** La escala decibel se basa en potencias de 10. El oído responde a la intensidad sonora en forma logarítmica. Cada vez que la intensidad del sonido se hace 10 veces mayor, el nivel de intensidad en decibeles aumenta por 10 unidades. De modo que un sonido de

(a) 10 dB es diez veces más intenso que el umbral de audición, (b) 30 dB es mil veces más intenso que el umbral de audición y (c) 60 dB es un millón de veces más intenso que el umbral de audición. **29.** Un sonido de 40 dB es diez veces más intenso que un sonido de 30 dB. **31.** El segundo armónico es la primera octava (doble de la frecuencia fundamental) y el cuarto armónico es la segunda octava (cuatro veces la frecuencia fundamental), de modo que hay un armónico, el tercero, entre la primera y segunda octavas. La tercera octava, con una frecuencia ocho veces la frecuencia de la fundamental, es la misma que el octavo armónico, de modo que hay tres armónicos (quinto, sexto y séptimo) entre la segunda y tercera octavas. (También puedes obtener las respuestas si piensas en longitudes de onda. El segundo armónico tiene la mitad de la longitud de onda de la fundamental, el tercer armónico tiene un tercio la longitud de onda, el quinto armónico tiene un quinto la longitud de onda, y así sucesivamente. Las longitudes de onda de las octavas son un medio, un cuarto, un octavo, y así sucesivamente, de modo que corresponden a los armónicos segundo, cuarto, octavo, etcétera.)

### Piensa y clasifica

**33.** A, C, B

### Piensa y explica

**35.** Una altura mayor significa una frecuencia más alta. **37.** Las cuerdas se calientan y se expanden mientras se pulsan. Por tanto, deben afinarse mientras están calientes para reducir al mínimo una nueva afinación cuando se está en el escenario. **39.** Una altura más baja se produce cuando la cuerda de una guitarra (a) se alarga, (b) se afloja de modo que la tensión se reduzca y (c) se hace más masiva, por lo general mediante devanados de alambre alrededor de la cuerda. Es por ello que las cuerdas de los bajos son gruesas: mayor inercia. **41.** Las frecuencias del sonido y de la cuerda oscilatoria son iguales. **43.** Si la longitud de onda de una cuerda vibratoria se reduce, como cuando la presionas con el dedo contra un traste, la frecuencia de la vibración aumenta. Esto se escucha como un aumento de altura. **45.** Los brazos más largos tienen una mayor inercia rotacional, lo cual significa que serán más resistentes a la vibración y lo harán a una frecuencia más baja. **47.** La cuerda más delgada tiene menos masa y menos inercia y, por tanto, una frecuencia más alta. **49.** Una cuerda de guitarra pulsada vibraría durante un tiempo más largo sin una caja acústica, porque menos aire se pone en movimiento por unidad de tiempo, lo cual significa que la energía de la cuerda vibratoria disminuye con más lentitud. **51.** Además de hojas de papel en los extremos de soporte de la cuerda, cuando una cuerda vibra en dos segmentos puede colocarse un trozo en el nodo de su centro. Para tres segmentos, pueden sostenerse dos trozos, cada uno a un tercio de la distancia total desde cada extremo. **53.** La amplitud en una onda sonora corresponde a la alta presión de la compresión o, de manera equivalente, a la baja presión de la rarefacción. **55.** El patrón a la derecha tiene mayor amplitud y por tanto es más sonoro. **57.** La intensidad sonora es un atributo meramente objetivo y físico de una onda sonora y puede medirse con diversos instrumentos acústicos. La sonoridad, aunque muy relacionada, es una sensación fisiológica y puede variar de una persona a otra o en una misma persona en diferentes momentos. **59.** Un órgano electrónico produce los sonidos de varios instrumentos musicales al duplicar y superponer las ondas sinusoidales que constituyen las ondas globales producidas por estos instrumentos. **61.** Tu voz suena más plena en una ducha principalmente por el pequeño recinto que hace que tu voz reverbere mientras se refleja de pared a pared. **63.** El campo de audición humana, desde más o menos 20 Hz hasta 20,000 Hz, es un factor de alrededor de 1,000. Esto es diez octavas porque diez duplicaciones de frecuencia producen un factor de alrededor de 1,000 (1,024 para ser exactos). El rango de un piano es un poco más que siete octavas. **65.** La frecuencia del segundo armónico es el doble de la fundamental, o 440 Hz. El tercero es tres veces el armónico, o 660 Hz. **67.** Sin incluir los puntos extremos, hay cinco nodos en una onda estacionaria que tiene tres longitudes de onda de largo, y siete nodos en una onda estacionaria que tiene cuatro longitudes de onda de largo. (¡Realiza un dibujo y cuéntalas!) **69.** Un analizador Fourier es un dispositivo que ordena cada una de las ondas sinusoidales de una mezcla de dos o más ondas sinusoidales, que es justo lo que hace el oído humano. Tú escuchas los tonos puros que constituyen un tono complejo. **71.** Respuesta abierta.

### Piensa y discute

**73.** La longitud de una flauta es crucial para las notas que reproduce. La expansión o contracción de la flauta con la temperatura puede cambiar su tono, y por tanto cambiar la afinación entre los instrumentos. **75.** Cuando la cuerda del piano se golpea, oscila no sólo en su modo fundamental de 220 Hz cuando está afinada, sino también en su segundo armónico a 440 Hz. Si la cuerda está desafinada, este segundo armónico batirá contra el diapasón de 440 Hz. Para afinar la cuerda escuchas estos batimientos y luego aprietas o aflojas la cuerda hasta que el batimiento desaparece. **77.** Cada uno percibe lo que se le ha enseñado o ha aprendido a percibir. Esto se aplica a la apreciación del arte, al gusto por la comida y la bebida, y al valor que se le da a lo que huele y a las texturas que toca. La percepción de lo que es real en términos de creencias religiosas y políticas y las nociones acerca del lugar que cada uno ocupa en el esquema de las cosas son producto de lo que cada quien aprendió (o no aprendió).

## Capítulo 22

### Preguntas conceptuales

**1.** *Electrostática* es el término para la electricidad en reposo. **3.** El núcleo y sus protones tienen carga positiva; los electrones tienen carga negativa. **5.** La carga neta normal es cero. **7.** La conservación de la carga significa que la carga no puede crearse o destruirse, sino sólo transferirse. **9.** Un electrón (o protón) tiene exactamente un cuanto de unidad de carga. **11.** Ambas son leyes del inverso al cuadrado. La principal diferencia es que la gravitación sólo es de atracción, mientras que las fuerzas eléctricas pueden repeler. **13.** Los átomos de los aislantes son malos conductores debido a la fuerte retención de sus electrones. **15.** Un transistor está compuesto de delgadas capas de materiales semiconductores. Sus funciones consisten en controlar el flujo de electrones, amplificar señales y actuar como interruptores. **17.** Los electrones se transfieren de un lugar a otro. **19.** Durante las tormentas eléctricas ocurre carga por inducción. **21.** A diferencia de un objeto cargado, un objeto polarizado puede no tener carga neta. **23.** $H_2O$ es un dipolo eléctrico. **25.** La dirección de un campo eléctrico es la dirección de la fuerza sobre una carga positiva. **27.** El campo eléctrico en el interior del conductor se cancela a cero. **29.** No. Varios miles de volts es diferente de la *razón* de varios miles de volts por coulomb. El voltaje se mide en volts; voltaje/coulomb es energía y se mide en joules. Varios miles de joules por coulomb no es mucha energía si tienes una pequeña fracción de coulomb.

### Piensa y realiza

**31.** ¡En climas secos ésta es una molestia común! **33.** De hecho, el chorro se desvía, debido a la polaridad de las moléculas de agua.

### Sustituye y listo

**35.** $F = K\dfrac{q_1 q_2}{d^2} = 9\times10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2\,\dfrac{(0.1\ \text{C})(0.1\ \text{C})}{(0.2\ \text{m})^2} = 2.25\times10^9\ \text{N}.$

### Piensa y resuelve

**37.** A partir de la ley de Coulomb, la fuerza está dada por $F = \dfrac{kq^2}{d^2}$, de modo que el cuadrado de la carga es

$q^2 = \dfrac{Fd^2}{k} = \dfrac{(20\ \text{N})(0.06\ \text{m})^2}{9\times10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2} = 8.0\times10^{-12}\ \text{C}^2$. Al sacar la raíz cuadrada de esto se obtiene $q = 2.8\times10^{-6}$ C, o 2.8 microcoulombs. **39.** $F_{grav} = mg = (9.1\times10^{-31}\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2) = 8.9\times10^{-30}$ N. $F_{elec} = qE = (1.6\times10^{-19}\ \text{C})(10{,}000\ \text{V/m}) = 1.6\times10^{-15}$ N, ¡más de $10^{14}$ veces mayor que la fuerza gravitacional!

**41.** El campo eléctrico es fuerza dividida entre carga:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{3.2\times10^{-4}\ \text{N}}{1.6\times10^{-10}\ \text{C}} = 2\times10^6\ \text{N/C}.$$

(La unidad N/C es la misma que la unidad V/m, de modo que el campo puede expresarse como 2 millones de volts por metro.) **43.** El potencial se define como la energía por unidad de carga, de modo que $V = \text{PE}/q = (0.1\ \text{J})/(1.0\times10^{-6}\ \text{C}) = 1\times10^5$ V, o 100,000 V. **45.** (a) A partir de $E = \dfrac{F}{q}$, se ve que $q = \dfrac{F}{E} = \dfrac{mg}{E} = \dfrac{(1.1\times10^{-14})(9.8)}{1.68\times10^5} = 6.4 = 10^{-19}$ C.

(b) Número de electrones $= \dfrac{6.4\times10^{-19}\ \text{C}}{1.6\times10^{-19}\ \text{C/electrón}} = 4$ electrones.

### Piensa y clasifica

**47.** C, B, A

### Piensa y explica

**49.** Los electrones están holgadamente enlazados en el exterior de los átomos, mientras que los protones están enlazados con firmeza en el interior de los núcleos atómicos. **51.** La ropa se carga cuando los electrones provenientes de una prenda de un material se frotan sobre otro material. Si los materiales fueran buenos conductores, la descarga entre materiales pronto ocurriría. Pero las prendas no son conductoras y la carga permanece el tiempo suficiente como para que las ropas con carga opuesta se atraigan eléctricamente y se peguen entre sí. **53.** El exceso de electrones frotado de tu cabello lo deja con una carga positiva; el exceso de electrones en el peine le da una carga negativa. **55.** En tiempos antiguos, antes de que los neumáticos de los camiones se hicieran conductores de electricidad, las carrocerías de los camiones solían arrastrar cadenas o alambres sobre la superficie del camino. Su propósito era descargar cualquier carga que se hubiera

acumulado por la fricción con el aire y el camino. Los neumáticos conductores de electricidad que se usan ahora impiden la acumulación de carga estática que pudiera producir una chispa, especialmente peligrosa para los camiones que transportan carga inflamable. **57.** Los rayos cósmicos producen iones en el aire, lo cual ofrece una trayectoria conductora para la descarga de los objetos cargados. Las partículas de rayos cósmicos que fluyen hacia abajo a través de la atmósfera son atenuadas por el decaimiento radiactivo y por absorción, de modo que la radiación y la ionización son más intensas a grandes altitudes que a bajas altitudes. **59.** El cristal en su totalidad tiene carga neta cero, de modo que cualquier carga negativa en una parte se contrarresta con igual cantidad de carga positiva en otra parte. De modo que la carga neta de los electrones negativos tiene la misma magnitud que la carga neta de los iones. (Este equilibrio de cargas positiva y negativa dentro del cristal es casi, aunque no precisamente, perfecto, porque el cristal puede ganar o perder algunos electrones adicionales.) **61.** Los electrones se desalojan con facilidad de las regiones exteriores de los átomos, pero los protones se mantienen firmemente dentro del núcleo. **63.** Los electrones son atraídos hacia los 50 mil trillones de protones con carga positiva en los núcleos atómicos de los átomos en la moneda. **65.** La ley del inverso al cuadrado entra en juego aquí. A la mitad de la distancia el campo de fuerza eléctrica es cuatro veces más intenso; a un cuarto de distancia, 16 veces más intenso; a cuatro veces la distancia, un dieciseisavo de intenso. **67.** Duplicar una carga duplica la fuerza. La magnitud de la fuerza no depende del signo de la carga. **69.** El enorme valor de la constante $k$ para fuerza eléctrica indica una fuerza relativamente enorme entre cargas, comparada con la pequeña fuerza gravitacional entre masas y el pequeño valor de la constante gravitacional $G$. **71.** Por convención, la dirección va de positivo a negativo, como indica la flecha. **73.** Desaparece la resistencia eléctrica. **75.** Los pararrayos son más altos con la finalidad de estar más cerca de las nubes, más cerca de los relámpagos. **77.** Un átomo neutro en un campo eléctrico está eléctricamente distorsionado (consulta la Figura 22.11). Si el campo es suficientemente intenso, la distorsión resulta en una ionización, donde las cargas se desprenden unas de otras. Entonces los iones proporcionan una trayectoria conductora para una corriente eléctrica. **79.** Las partículas de pintura en la humedad se polarizan y, por tanto, son atraídas hacia la carrocería cargada del automóvil. **81.** Las fuerzas sobre electrón y protón serán iguales en magnitud, pero opuestas en dirección. **83.** Electrón y protón acelerarán en direcciones opuestas. **85.** El electrón tendrá mayor rapidez en el impacto. La fuerza sobre ambos es la misma y la distancia es la misma, de modo que el trabajo realizado por el campo es el mismo y la EC de las partículas es la misma. Pero para la misma EC, la partícula con menor masa, el electrón, tendrá mayor rapidez. **87.** Los trozos de hilo se polarizan en el campo eléctrico, con un extremo positivo y el otro negativo, y se convierten en contrapartes eléctricas de los polos norte y sur de la brújula magnética. Fuerzas opuestas sobre el extremo de las fibras (o aguja de la brújula) producen momentos de torsión que orientan las fibras a lo largo de la dirección del campo (observa más adelante la Figura 24.3 en el Capítulo 24). **89.** Su cambio es 10 volts (10 joules por coulomb es 10 volts). **91.** Voltaje = (0.5 J)/0.001 C = 5,000 V. **93.** Las cargas son de igual magnitud porque la carga tomada de una placa se cede a la otra. Por ello la carga neta de un capacitor siempre es cero. **95.** Es peligroso porque el capacitor todavía puede estar cargado. **97.** Cero, ya sea que la carga esté o no en el exterior. **99.** De acuerdo con tu amigo. Los cabellos actúan como hojas en un electroscopio. Si tus brazos fuesen muy ligeros, también se pararían.

### Piensa y discute

**101.** La envoltura cargada polariza muy bien el plástico no conductor en lugar del metal, lo que resulta en mejor adherencia sobre el plástico que sobre el metal. **103.** La moneda será un poco más masiva con una carga negativa porque tendrá más electrones que cuando es neutra. Si la moneda tuviera carga positiva, sería un poco más ligera debido a los electrones faltantes. **105.** La ley se escribiría igual. **107.** El anillo a la mitad tiene mayor campo eléctrico en su centro porque el campo eléctrico en el centro del anillo completo se cancela. El campo eléctrico en el centro del medio anillo se debe a una multitud de vectores eléctricos, con componentes verticales que se cancelan y componentes horizontales que se suman y producen un campo resultante que actúa en sentido horizontal hacia la derecha.

## Capítulo 23

### Preguntas conceptuales

**1.** El calor debe tener una diferencia en temperatura. La carga debe tener una diferencia en potencial eléctrico. **3.** Los electrones en los metales tienen libertad para vagar, mientras que los protones están incrustados en los núcleos atómicos; no tienen libertad para deambular. **5.** Un tipo es una batería; otro es un generador. **7.** La carga eléctrica fluye a través de un circuito. El voltaje no fluye en absoluto, sino que se transmite a través del circuito. **9.** Calentar un alambre metálico aumenta el movimiento molecular y, por tanto, su resistencia eléctrica. **11.** Cuando la resistencia se duplica, la corriente se reduce a la mitad. **13.** La humedad reduce la resistencia eléctrica de tu cuerpo. **15.** Una batería produce CD. Un generador usualmente produce CA. **17.** Un diodo pasa corriente sólo en una dirección. **19.** El error es que ninguna partícula puede viajar con la rapidez de la luz. **21.** La velocidad de deriva es la velocidad neta de los electrones que constituyen una corriente eléctrica. **23.** El error es que la fuente es los mismos alambres conductores, no la fuente de poder. **25.** Cuando recibes un choque, tu propio cuerpo es la fuente de los electrones, mas no la fuente de la energía impartida a ellos. **27.** Un watt y un kilowatt son unidades de potencia. Un kilowatt-hora es una unidad de energía. **29.** La corriente es 1 A en cualquier parte en dos lámparas conectadas en serie. **31.** Ambas lámparas tienen 6 volts a través de ellas cuando se conectan en paralelo. **33.** Un fusible o un disyuntor evitan la sobrecarga que puede producir un incendio.

### Piensa y realiza

**35.** ¡Una actividad cerca de casa!

### Sustituye y listo

**37.** $I = \dfrac{V}{R} = \dfrac{120\ V}{15\ \Omega} = 8\ A.$

**39.** $I = \dfrac{V}{R} = \dfrac{120\ V}{240\ \Omega} = 0.5\ A.$

**41.** $P = IV = (10\ A)(120\ V) = 1{,}200\ \text{W}.$

### Piensa y resuelve

**43.** A partir de la fórmula potencia = corriente × voltaje, se tiene 60 watts = corriente × 120 volts y corriente $= \dfrac{60\ \text{W}}{120\ V} = 0.5\ A.$ **45.** A partir de potencia = corriente × voltaje, corriente $= \dfrac{\text{potencia}}{\text{voltaje}} = \dfrac{1{,}200\ \text{W}}{120\ V} = 10\ A.$ Entonces resistencia $= \dfrac{\text{voltaje}}{\text{corriente}} = \dfrac{120\ \text{V}}{10\ \text{A}} = 12\ \Omega.$ **47.** Primero, 100 watts = 0.1 kilowatt. Segundo, en una semana hay 168 horas (7 días × 24 horas/día = 168 horas). De modo que 168 horas × 0.1 kilowatt = 16.8 kilowatt-hora, que a 15 centavos por kWh se convierte en $2.52. **49.** La potencia de la plancha es $P = IV = (110\ V)(9\ A) = 990\ \text{W} = 990\ \text{J/s}$. La energía térmica generada en 1 minuto es $E$ = potencia × tiempo = (990 J/s)(60 s) = 59,400 J. **51.** La resistencia del tostador es $R = V/I = (120\ V)/(10\ A) = 12\ \Omega$. De modo que, cuando se aplican 108 V, la corriente es $I = V/R = (108\ V)/(12\ \Omega) = 9.0$ A y la potencia es $P = IV = (9.0\ A)(108\ V) = 972$ W, sólo 81 por ciento de la potencia normal. (¿Puedes ver la razón de este 81 por ciento? Corriente y voltaje disminuyen ambos en 10 por ciento, y $0.9 \times 0.9 = 0.81$.)

### Piensa y clasifica

**53.** A = B = C **55.** A, B, C

### Piensa y explica

**57.** Un flujo sostenido necesita una diferencia sostenida en potencial a través de un medio conductor, debido a una batería o generador. **59.** El flujo es de 6 galones por minuto (10 − 4 = 6). **61.** El sistema de enfriamiento de un automóvil es más análogo a un circuito eléctrico porque es un sistema cerrado y contiene una bomba, como la batería u otra fuente de voltaje en un circuito. La manguera de agua no recircula el agua como lo hace el sistema de enfriamiento del automóvil. **63.** El circuito en el centro es un circuito completo y encenderá la lámpara. **65.** Seis joules de energía se suministran a cada coulomb que pasa por una batería de 6 volts. **67.** Tu tutor está equivocado. Un ampere mide corriente, y un volt mide potencial eléctrico ("presión" eléctrica). Son conceptos totalmente diferentes: el voltaje produce amperes en un conductor. **69.** No para ambas preguntas. La corriente fluye *por* los dispositivos eléctricos, tal como el agua fluye por un circuito de tuberías. Si una bomba de agua produce presión de agua, el agua fluye tanto por la bomba como por el circuito. Lo mismo sucede con la corriente eléctrica en un circuito eléctrico. Por ejemplo, en un circuito simple que consiste de una batería y una lámpara, la corriente eléctrica producida en la lámpara es la misma corriente eléctrica en los alambres que conectan la lámpara y la misma corriente eléctrica que fluye por la batería. La carga eléctrica fluye por estos dispositivos (el flujo de carga es la corriente). **71.** Tu amigo comparte voltaje de su batería al conectar las dos baterías en paralelo. **73.** Si todo lo demás permanece igual, un material con trayectoria libre media corta ofrece más resistencia al flujo de electrones y tiene mayor resistencia eléctrica. En todos los materiales, la aplicación de calor impone más caos molecular y acorta la trayectoria aún más, lo que aumenta la resistencia en la mayoría de los materiales. Así que para alargar la trayectoria, sólo enfría el material. Las conductividades aumentan mucho en la mayoría de los materiales cuando se enfrían

a bajas temperaturas. **75.** Más de 90% de la energía eléctrica en una lámpara incandescente pasa directamente a calor. La energía térmica es el cementerio de la energía eléctrica. **77.** Los alambres gruesos tienen menos resistencia y transportan corrientes de un modo más efectivo sin un calentamiento excesivo. **79.** El filamento grueso tiene menos resistencia y extraerá (portará) más corriente que un alambre delgado conectado a través de la misma diferencia de potencial. **81.** En el primer caso, la corriente atraviesa tu pecho; en el segundo caso, la corriente sólo atraviesa tu brazo. Puedes cortarte el brazo y sobrevivir, pero no puedes sobrevivir sin el corazón. **83.** Los faros de los automóviles están alambrados en paralelo. Cuando uno se quema, el otro permanece encendido. Si alguna vez has visto un automóvil con un faro quemado, tienes evidencia de que están alambrados en paralelo. **85.** (a) Volt, (b) ampere, (c) joule. **87.** El voltaje a través de ramas paralelas, cualquiera sea la resistencia, permanece igual. **89.** La señal es una broma. El voltaje alto puede ser peligroso, pero la resistencia alta es una propiedad de todos los no conductores. **91.** En general el daño ocurre por el calentamiento excesivo cuando demasiada corriente se conduce a través de un electrodoméstico. **93.** Cero. Las compañías eléctricas no venden electrones; venden energía. Cualquiera que sea el número de electrones que fluya hacia una casa, el mismo número fluye hacia afuera. **95.** La energía eléctrica se propaga a través de un circuito mediante campos eléctricos que se mueven cerca de la rapidez de la luz, no por colisiones de electrones. El sonido, por otra parte, viaja por colisiones moleculares o atómicas, un proceso mucho más lento. **97.** El brillo permanece igual. **99.** La bombilla C es la más brillante porque el voltaje a través de ella es igual a la de la batería. Las bombillas A y B comparten el voltaje de la rama paralela del circuito y tienen la mitad de la corriente de la bombilla C (si supones que las resistencias son independientes de los voltajes). Si la bombilla A se desatornilla, la rama superior ya no es parte del circuito y la corriente cesa tanto en A como en B. Ya no proporcionan luz, mientras que la bombilla C brilla como antes. Si en vez de ello se desatornilla la bombilla C, entonces sale y las bombillas A y B brillan como antes. **101.** La corriente de línea disminuye conforme se conectan más dispositivos en serie. Pero la corriente de línea aumenta a medida que más dispositivos se conectan en paralelo. Esto se debe a que la resistencia del circuito aumenta cuando se agregan dispositivos en serie, pero disminuye (más rutas) cuando los dispositivos se agregan en paralelo. **103.** Todos son iguales para resistores idénticos en serie. Si los resistores no son iguales, entonces el de mayor resistencia tiene menos voltaje a través de sí y menos potencia disipada en él. Sin embargo, sin importar las resistencias, la corriente a través de ambos es la misma. **105.** Sí. Habrá una disminución en el brillo cuando demasiadas lámparas se conecten en paralelo debido al aumento de corriente que fluye por la batería. La caída interna de voltaje aumenta con la corriente en la batería, lo cual significa que se suministra un voltaje reducido en sus terminales al circuito que alimenta. (Si el circuito en paralelo se alimenta con una fuente más intensa, como el que proporciona la compañía eléctrica por los tomacorrientes comunes de pared, no se verán bombillas atenuadas conforme se agreguen más rutas paralelas.) **107.** Un fusible en serie con cualquiera de los aparatos podría ser útil porque se fundiría sólo si algo saliera mal con dicho aparato particular.

### Piensa y discute

**109.** Un resistor no "atrae" o "extrae" la corriente, tal como una tubería en un circuito de plomería no "extrae" agua. Más bien, "permite" o "facilita" el paso de corriente cuando a través de él se establece una presión eléctrica. **111.** La resistencia equivalente de los resistores en serie es su suma, de modo que conecta un par de resistores en serie para una mayor resistencia. **113.** Una bombilla se quema cuando el filamento se rompe o cuando se desintegra o se separa. **115.** De acuerdo, porque incluso para el resistor más pequeño, la corriente tiene una trayectoria alternativa, lo que constituye una resistencia global más pequeña. **117.** Puede conectar cuatro resistores de 40 ohm en paralelo. **119.** La bombilla de 100 watts tiene el filamento más grueso y la resistencia más baja, de modo que en serie, donde la corriente es la misma en cada bombilla, menos energía se disipa al pasar por la resistencia más baja. Esto corresponde a un menor voltaje a través de la resistencia —una menor caída de voltaje—. De este modo, la mayor caída de voltaje será a través de la bombilla de 60 watts en serie. Es interesante que, ¡la bombilla de 60 watts en serie sea más brillante que la bombilla de 100 watts! Cuando la bombilla se conecta en paralelo, el voltaje a través de cada bombilla es el mismo, y la corriente es mayor en la bombilla de 100 watts con la resistencia más baja, la cual será más brillante que la bombilla de 60 watts. **121.** (a) Por la ley de Ohm, la corriente en el resistor de 6 ohm es $V/R = 12\ \text{V}/6\ \Omega = 2\ A$. (b) Los otros dos resistores, en serie, suman 12 ohms, de modo que la corriente en ellos es $12\ V/12\ \Omega = 1\ A$. (c) La corriente en la fuente de voltaje es la corriente total: $2\ A + 1\ A = 3\ A$. (d) Dos formas de encontrar $R_{eq}$: (1) A partir de $I_{total} = V/R_{eq}$, $R_{eq} = V/I_{total} = 12\ \text{V}/3\ A = 4\ \Omega$. (2) Debido a que el circuito tiene 6 ohms en paralelo con 12 ohms, puede usarse la regla de "producto sobre suma" para encontrar la resistencia combinada: $R = (R_1 \times R_2)/(R_1 + R_2) = (6 \times 12)/(6 + 12) = 4\ \Omega$.

## Capítulo 24

### Preguntas conceptuales

**1.** Hans Christian Oersted, en una clase de bachillerato, advirtió cómo una corriente afecta un imán, relacionando así la electricidad y el magnetismo. **3.** Los electrones en movimiento son la fuente de la fuerza magnética. **5.** Los polos magnéticos no pueden aislarse; las cargas eléctricas sí pueden aislarse. **7.** El movimiento de las cargas eléctricas produce un campo magnético. **9.** Un dominio magnético es un grupo de átomos alineados. **11.** El hierro tiene dominios magnéticos, la madera no. **13.** El campo magnético adopta la forma de círculos concéntricos alrededor de un alambre que porta corriente. **15.** Dentro de la espira las líneas están más concentradas. **17.** Un mayor flujo de electrones produce una mayor intensidad de campo magnético. **19.** La fuerza es máxima cuando el movimiento es perpendicular al campo; mínima cuando es paralelo al campo. **21.** La fuerza es máxima cuando la corriente es perpendicular al campo. **23.** Cuando se calibra para la corriente, un galvanómetro es un amperímetro; cuando se calibra para el voltaje, un voltímetro. **25.** Sí. Un motor es un galvanómetro complicado. **27.** Las inversiones del polo magnético son inversiones de los polos norte y sur, comunes a lo largo de toda la historia de la Tierra. **29.** Seis criaturas son bacterias, palomas, abejas, mariposas, tortugas marinas y peces.

### Piensa y realiza

**31.** Una actividad que vale la pena.

### Piensa y explica

**33.** La separación es sencilla con un imán (¡inténtalo y sorpréndete!). **35.** La manera en que se mueve la carga dicta la dirección de su campo magnético. (Un campo magnético es una cantidad vectorial.) Los campos magnéticos se cancelan, más en algunos materiales que en otros. **37.** Ocurrirá atracción porque el imán induce una polaridad opuesta en un trozo cercano de hierro. El norte inducirá sur, y el sur inducirá norte. Esto es similar a la inducción de carga, donde un globo se pegará a una pared ya sea que el globo tenga carga positiva o negativa. **39.** Los polos del imán se atraen entre sí y hacen que el imán se doble, incluso lo suficiente para que los polos se toquen si el material es suficientemente flexible. **41.** Los imanes de refrigerador tienen tiras estrechas de polos norte y sur alternados. Estos imanes son suficientemente fuertes como para sostener hojas de papel contra la puerta de un refrigerador, pero tienen un rango muy corto porque los polos norte y sur se cancelan a poca distancia de la superficie magnética. **43.** Un imán inducirá la alineación de los dominios magnéticos de un clavo o un clip. Los polos opuestos en el imán y el objeto de hierro están entonces más cerca unos de otros y resulta una atracción (eso es similar a un peine cargado que atrae pedazos de papel eléctricamente neutro; consulta la Figura 22.13). Un lápiz de madera, por otra parte, no tiene dominios magnéticos que interactúen con un imán. **45.** Los dominios en el clip son inducidos a alinearse en una forma similar a la polarización de carga eléctrica en un aislante cuando un objeto cargado se acerca. Cualquier polo de un imán inducirá una alineación de dominios en el clip: resulta atracción porque el polo de los dominios alineados que está más cerca al polo del imán siempre es el polo opuesto. **47.** El mecanismo de alineación comprende dos factores. Primero, cada limadura se convierte en un pequeño imán por el campo magnético del imán de barra, que induce una alineación de dominios en la limadura. Segundo, un par de momentos de torsión iguales y opuestos actúan sobre cada limadura siempre que no esté paralela a las líneas del campo magnético. Estos momentos de torsión giran las limaduras hasta alinearlas con las líneas del campo como pequeñas agujas de brújula. **49.** Sí. La brújula se alinea con el campo magnético de la Tierra, que se extiende del polo magnético en el hemisferio sur al polo magnético en el hemisferio norte. **51.** ¡De vuelta a la tercera ley de Newton! Los imanes A y B se jalan por igual uno a otro. Si A jala sobre B con 50 newtons, entonces B también jala sobre A con 50 newtons. ¡Punto! **53.** De nuevo la tercera ley de Newton: sí, el clip, como parte de la interacción, sin duda ejerce una fuerza sobre el imán, tanta como el imán jala sobre él. El imán y el clip jalan por igual uno sobre otro para constituir la interacción individual entre ellos. **55.** Las vibraciones tanto en la bobina como en el cono de la bocina tienen frecuencias idénticas en cualquier instante. **57.** Así como como un clavo se magnetiza al golpearlo, un barco de hierro se golpea en su fabricación, lo que lo convierte en un imán permanente. Su orientación magnética inicial, que es un factor en posteriores mediciones magnéticas, en efecto se registra en la placa de bronce. **59.** Un electrón debe moverse por las líneas de un campo magnético a fin de percibir una fuerza magnética. De modo que un electrón en reposo en un campo magnético estacionario no sentirá ninguna fuerza que lo ponga en movimiento. Sin embargo, en un campo eléctrico, un electrón puede acelerar ya sea que esté o no en movimiento. (Una combinación de campos magnético y eléctrico se usa

en aceleradores de partículas, como los ciclotrones. El campo eléctrico acelera la partícula cargada en su dirección, y el campo magnético la acelera perpendicular a su dirección.) **61.** Si las partículas entran al campo moviéndose en la misma dirección y se desvían en direcciones opuestas (por decir, una a la izquierda y otra a la derecha), las cargas deben ser de signo opuesto. **63.** Si el campo interactúa con un imán de barra estacionario, es magnético; si lo hace con una carga estacionaria, es eléctrico. Si se genera una corriente eléctrica al girar la espira de alambre, el campo es magnético. Si una fuerza actúa sólo sobre una carga en movimiento, el campo es magnético. De modo que cualquiera de las clases de experimentos que traten con una carga eléctrica en reposo y una carga eléctrica en movimiento puede servir para determinar la naturaleza del campo en la habitación. **65.** Los cinturones de radiación Van Allen están llenos con enjambres de partículas cargadas de alta energía que pueden lesionar el tejido vivo. Por tanto, los astronautas se esfuerzan por mantenerse abajo de estos cinturones. **67.** Los iones cargados en forma individual que viajan con la misma rapidez a través del mismo campo magnético experimentan la misma fuerza magnética. La medida de sus desviaciones depende de sus aceleraciones, las cuales a su vez dependen de sus respectivas masas. Los iones menos masivos se desvían más, y los más masivos se desvían menos. (Consulta en la Figura 34.14 del Capítulo 34 un diagrama de un espectrógrafo de masas.) **69.** Para determinar sólo por sus interacciones mutuas cuál de dos barras es un imán, coloca el extremo de la barra 1 en el punto medio de la barra 2 (como formando una "T"). Si existe una atracción, entonces la barra 1 es el imán. Si no hay atracción, entonces la barra 2 es el imán. **71.** Sí. Cada uno experimentará una fuerza porque cada uno está en el campo magnético generado por el otro. Es interesante que las corrientes en la misma dirección se atraigan y las corrientes en direcciones opuestas se repelan. **73.** Las corrientes son inducidas en los metales por el campo magnético variable del aparato IRM.

### Piensa y discute

**75**. La aguja de inclinación apuntará casi verticalmente cerca de los polos magnéticos de la Tierra, donde el campo apunta hacia o desde los polos (que están enterrados profundo bajo la superficie). Apuntará casi horizontalmente cerca del ecuador (observa la Figura 24.20). **77.** La fuerza neta sobre la aguja de una brújula es cero porque sus polos norte y sur son jalados en direcciones opuestas con iguales fuerzas en el campo magnético de la Tierra. Cuando la aguja no está alineada con el campo magnético de la Tierra, entonces se produce un par de momentos de torsión (con respecto al centro de la brújula; consulta la Figura 24.3). Este par de momentos de torsión con igual intensidad, llamado "par", gira la aguja para alinearse con el campo magnético de la Tierra. **79.** El campo eléctrico en un ciclotrón o cualquier acelerador de partículas cargadas fuerza a las partículas hacia mayores rapideces, mientras que el campo magnético fuerza a las partículas en trayectorias curvas. Una fuerza magnética sólo puede cambiar la dirección (no la rapidez) de una partícula cargada, porque la fuerza siempre es perpendicular a la velocidad instantánea de la partícula. (Es muy interesante que, en un acelerador llamado betatrón, el campo eléctrico se produzca con un campo magnético variable.) **81.** Sí. Asociado a cada partícula cargada en movimiento (electrones, protones o cualquier cosa) hay un campo magnético. Dado que un campo magnético no es exclusivo de los electrones en movimiento, también hay un campo magnético en torno a los protones en movimiento. Sin embargo, difiere en dirección. Las líneas de campo en torno al haz de protones dan vueltas en una dirección, y las líneas de campo en torno a un haz de electrones lo hacen en la dirección opuesta. (Los físicos usan una "regla de la mano derecha": si el pulgar derecho apunta en la dirección de movimiento de una partícula positiva, los dedos curvados de dicha mano muestran la dirección del campo magnético. Para partículas negativas puede usarse la mano izquierda.)

## Capítulo 25

### Preguntas conceptuales

**1.** Cada quien por su cuenta, ambos descubrieron la inducción electromagnética. **3.** El voltaje inducido en una bobina es proporcional al producto de su número de espiras, al área transversal de cada espira y a la tasa a la que cambia el campo magnético dentro de dichas espiras. **5.** Ambas frecuencias son iguales. **7.** La corriente es CA porque el voltaje inducido es CA. **9.** Faraday y Henry hicieron el descubrimiento; Tesla lo puso en práctica. **11.** En general, el vapor suministra energía a una turbina. **13.** Un generador MHD no tiene partes móviles. **15.** Potencia es la tasa a la que se transfiere energía. **17.** Un transformador cambia el voltaje y la corriente, pero no la energía y la potencia. **19.** Un transformador reductor reduce el voltaje. **21.** La operación de un transformador depende del cambio, en consecuencia de la corriente alterna, o CA. **23.** Sí. A esto se le llama autoinducción. **25.** No se necesitan alambres. Los dispositivos electrónicos personales lo demuestran. **27.** Se induce un campo eléctrico alterno. **29.** ¡No se necesitan alambres!

### Piensa y realiza

**31.** Respuesta abierta. **33.** Las latas contienen hierro. Los dominios en la lata tienden a alinearse con el campo magnético de la Tierra. Cuando las latas se dejan estacionarias durante varios días, las latas se magnetizan por inducción, y se alinean con el campo magnético de la Tierra.

### Sustituye y listo

**35.** $\dfrac{120\text{ V}}{10\text{ vueltas}} = \dfrac{x\text{ V}}{100\text{ vueltas}}$, donde $x = (10\text{ vueltas}) \times \dfrac{120\text{ V}}{10\text{ vueltas}} = 1{,}200\text{ V}$.

### Piensa y resuelve

**37.** $\dfrac{120\text{ V}}{500\text{ vueltas}} = \dfrac{6\text{ V}}{x\text{ vueltas}}$, $x\text{ vueltas} = 500\text{ vueltas} \times \dfrac{6\text{ V}}{120\text{ V}} = 25\text{ vueltas}$.

**39.** A partir de la relación del transformador,

$$\frac{\text{voltaje primario}}{\text{número de vueltas primario}} = \frac{\text{voltaje secundario}}{\text{número de vuelas secundario}} = \frac{120\text{ V}}{24\text{ V}} = \frac{5}{1}.$$

De modo que hay cinco veces más vueltas primarias que vueltas secundarias. **41.** El transformador sube voltaje por el factor 36/6 = 6. Por tanto, una entrada de 12 V subiría a 6 × 1 V = 72 V. **43.** El voltaje de subida es (12,000 V)/(120 V) = 100. De modo que debería haber 100 veces más vueltas en la secundaria en comparación con la primaria.

### Piensa y clasifica

**45.** B, C, A

### Piensa y explica

**47.** La inducción electromagnética requiere cambio, ya sea de la intensidad de un campo magnético o del movimiento en un campo magnético. **49.** Los dominios magnéticos que se alinean en el núcleo de hierro contribuyen al campo magnético global de la bobina y, por tanto, aumentan su inducción magnética. **51.** Debe realizarse trabajo para mover un conductor que porta corriente en un campo magnético. Esto sucede ya sea que la corriente se produzca de manera externa o como resultado de la inducción que acompaña al movimiento del alambre en el campo. También es cuestión de conservación de energía. Debe haber más entrada de energía si hay más salida de energía. **53.** Un ciclista viajará más lejos si la lámpara se desconecta del generador. La energía que se usa para activar la lámpara se toma de la energía cinética de la bicicleta, de modo que la bicicleta frena. El trabajo ahorrado al no encender la lámpara será la "fuerza × distancia" adicional que permita a la bicicleta viajar más lejos. **55.** Las corrientes parásitas inducidas en el metal cambian el campo magnético, que a su vez cambia la corriente CA en las bobinas y dispara una alarma. **57.** En ambos casos la dirección de la fuerza magnética es perpendicular al campo magnético y el movimiento de cargas, pero con diferentes resultados. En el efecto motor, la fuerza magnética empuja el alambre hacia arriba. En el efecto generador, el alambre es empujado hacia abajo y la fuerza magnética empuja electrones en una dirección a lo largo del alambre para producir una corriente. **59.** De acuerdo con tu amigo. Cualquier bobina de alambre que gire en un campo magnético que corta a través de las líneas de campo magnético es un generador. **61.** En concordancia con la inducción electromagnética, si el campo magnético alterna en el agujero del anillo, se induce un voltaje alterno en el anillo. Puesto que el anillo es metálico, su resistencia relativamente baja resulta en una corriente alterna correspondientemente alta. Esta corriente es evidente en el calentamiento del anillo. **63.** El electroimán es CA, lo cual significa un campo magnético que cambia de manera continua en el anillo de cobre. Esto induce una corriente en el anillo, que entonces se convierte en su propio electroimán, que es repelido de manera continua por el electroimán grande. La fuerza de repulsión es igual al peso del anillo, lo que produce un equilibrio mecánico. **65.** Dado que toda la resistencia eléctrica en este caso es simplemente la del alambre en sí (sin otra carga externa), el doble de la longitud de alambre significa el doble de resistencia. De modo que, aunque el doble de espiras significa el doble de voltaje, el doble de resistencia resulta en la misma corriente. **67.** El núcleo de hierro aumenta el campo magnético de la bobina primaria, como se enuncia en la respuesta a la pregunta 49. El campo más intenso significa un mayor cambio de campo magnético en el primario y un mayor voltaje inducido en el secundario. El núcleo de hierro en el secundario aumenta aún más el campo magnético variable a través del secundario y aumenta aún más el voltaje secundario. Más todavía: el núcleo guía más líneas de campo magnético del el primario al secundario. El efecto de un núcleo de hierro en las bobinas es la inducción de mucho más voltaje en el secundario. **69.** Cuando el voltaje secundario es doble que el voltaje primario, y el secundario actúa como fuente de voltaje para una "carga" resistiva, la corriente secundaria tiene la mitad del valor de la corriente en el primario. Esto está en concordancia con la conservación de la energía o, debido a que los intervalos de tiempo para cada uno son iguales, la "conservación de potencia".

Entrada de potencia = salida de potencia; o (corriente × voltaje)$_{primario}$ = (corriente × voltaje)$_{secundario}$; con valores numéricos,$(1 \times V)_{primario} = (1/2 \times 2V)_{secundario}$. (La fórmula simple potencia = corriente × voltaje es estrictamente válida sólo para circuitos CD y circuitos CA donde la corriente y el voltaje oscilen en fase. Cuando el voltaje y la corriente están fuera de fase, lo que puede ocurrir en un transformador, la potencia neta es menor que el producto corriente × voltaje. Entonces el voltaje y la corriente no "funcionan en conjunto". Cuando el secundario de un transformador está abierto, por ejemplo, conectado a nada, la corriente y el voltaje tanto en el primario como en el secundario están completamente fuera de fase; esto es, uno es máximo cuando el otro es cero, y no se suministra potencia neta aun cuando ni el voltaje ni la corriente sean cero.) **71.** Un transformador elevador multiplica voltaje en el secundario al tener más vueltas en la bobina secundaria que en la bobina primaria. Un transformador reductor hace lo contrario: menos vueltas en el secundario, lo que reduce el voltaje en el secundario. **73.** El nombre del juego en el electromagnetismo es *cambio*: si no hay cambio, no hay inducción. La corriente alterna cambia de dirección, usualmente a 60 Hz. **75.** Existe un espacio físico entre las dos. Sin embargo, están unidas por campos magnéticos variables: el mismo en cada bobina. **77.** ¡Ups! Éste es un circuito CD. A menos que haya una corriente variable en el primario, no se produce inducción. En el medidor no se inducen ni voltaje ni corriente. **79.** No, no, no, ¡mil veces no! Ningún dispositivo puede incrementar la energía. Este principio está en el corazón de la física. La energía no puede crearse ni destruirse. **81.** La fuente de una onda electromagnética es una carga eléctrica oscilatoria. **83.** La onda de radio incidente hace que oscilen los electrones de conducción en la antena. Esta carga oscilatoria (una corriente oscilatoria) proporciona la señal que alimenta al radio. **85.** De acuerdo con tu amigo. La luz es radiación electromagnética que tiene una frecuencia que coincide con la frecuencia a la cual son sensibles tus ojos.

### Piensa y discute

**87.** Los alambres de cobre no estaban aislados en la época de Henry. Una bobina de alambres no aislados que se tocan entre sí crearía un cortocircuito. Se usaba seda para aislar los alambres y que la corriente fluyera por los alambres en la bobina y no por las espiras que se tocan unas a otras. **89.** En los devanados del motor eléctrico que impulsa una sierra suceden dos cosas. La entrada de corriente los hace dar vueltas y tú tienes un motor. Pero el movimiento de los devanados en el campo magnético del motor también los convierte en un generador. La corriente neta en el motor es la corriente de entrada menos la corriente de salida generada, que es opuesta en dirección a la corriente de entrada. Tú pagas a la compañía eléctrica por la corriente neta. Cuando el motor se atasca, la corriente neta aumenta debido a la ausencia de corriente generada. ¡Esto puede quemar los devanados de la sierra! **91.** Conforme el imán cae, induce una corriente que da vueltas en la tubería conductora y se acompaña por su propio campo magnético. El imán en movimiento es frenado por la interacción con este campo inducido. **93.** El movimiento de las hojas conductoras a través de un campo magnético induce corrientes arremolinadas (corrientes parásitas) con campos que interactúan con el imán y frenan el movimiento. Esto no ocurre en el cartón no conductor. **95.** A través de las alas del avión en movimiento se induce una diferencia de voltaje. Esto produce una corriente momentánea, y en las puntas del ala se acumula carga para crear una diferencia de voltaje que contrarresta la diferencia de voltaje inducida. De modo que la carga se distribuye de manera equitativa en ambas direcciones y no se mueve.

## Capítulo 26

### Preguntas conceptuales

**1.** Un campo magnético variable induce un campo eléctrico variable. **3.** Una onda electromagnética se produce mediante campos eléctrico y magnético vibratorios. **5.** Si la onda acelerara, habría mayor regeneración de ondas y la energía aumentaría. Por tanto, esto no ocurre. **7.** La principal diferencia entre las ondas de radio, la luz y los rayos X es la frecuencia. **9.** El rojo es el color de las frecuencias más bajas; el violeta, el de las frecuencias más altas. **11.** Frecuencias más altas de luz tienen longitudes de onda más cortas. **13.** En primer lugar, el espacio exterior está lleno de ondas electromagnéticas. **15.** La frecuencia resonante del vidrio está en la región ultravioleta. **17.** La energía de la luz visible se transmite a través del vidrio y sale del otro lado. **19.** Las frecuencias son iguales. **21.** Las rapideces de la luz incidente y saliente son iguales. **23.** La luz se absorbe y se transforma en energía térmica. **25.** Múltiples reflexiones absorben luz, y la luz que sale es más débil. **27.** Todos los objetos en la luz solar proyectan sombras, de modo que, sí, la Tierra y la Luna siempre proyectan sombras. Cuando el Sol y la Luna pasan dentro de la sombra del otro, hay un eclipse. **29.** Los objetos de la periferia se ven mejor cuando se mueven.

### Piensa y realiza

**31.** Puede sorprenderte descubrir que el tamaño de la Luna en el cielo es el mismo ya sea que esté baja o alta en el firmamento, aun cuando a simple vista la Luna parezca más grande más cerca del horizonte. La explicación es fisiológica.

### Piensa y resuelve

**33.** Rapidez $= \dfrac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} = \dfrac{300{,}000{,}000\text{ km}}{1{,}300\text{ s}} = 231{,}000$ km/s. Este valor es 77 por ciento del valor moderno. **35.** A partir de $v = \dfrac{d}{t}$, se tiene $t = \dfrac{d}{v} = \dfrac{d}{c} = \dfrac{1.5\times10^{11}\text{ m}}{3\times10^{8}\text{ m/s}} = 500$ s (que es igual a 8.3 min). El tiempo para cruzar el diámetro de la órbita terrestre es el doble de esto, o 1,000 s, como estimó muy cercanamente Roemer (consulta la pregunta 33).

**37.** Se tiene $t = \dfrac{d}{v} = \dfrac{4.2\times10^{16}\text{ m}}{3\times10^{8}\text{ m/s}} = 1.4\times10^{8}$ s. Al convertir a años mediante análisis dimensional, se obtiene $1.4\times10^{8}\text{ s}\times\dfrac{1\text{ h}}{3{,}600\text{ s}}\times\dfrac{1\text{ día}}{24\text{ h}}\times\dfrac{1\text{ año}}{365\text{ días}} = 4.4$ años.

**39.** (a) Frecuencia = rapidez/longitud de onda = $(3 \times 10^8$ m/s$)/(0.03$ m$) = 1.0 \times 10^{10}$ Hz = 10 GHz. (b) Distancia = rapidez × tiempo, de modo que tiempo = distancia/rapidez = $(10{,}000$ m$)/(3 \times 10^8$ m/s$) = 3.3 \times 10^{-5}$ s. (Observa la importancia de usar unidades SI consistentes para obtener las respuestas numéricas correctas.)

### Piensa y explica

**41.** Tu amigo está en lo correcto. También con un tono profundo, ¡tu amigo podría decir que el sonido es la única cosa que escuchamos! **43.** La fuente fundamental de radiación electromagnética son cargas eléctricas en oscilación, que emiten campos eléctricos y magnéticos oscilatorios. **45.** El ultravioleta tiene longitudes de onda más cortas que el infrarrojo. En correspondencia, el ultravioleta tiene frecuencias más altas. **47.** Lo que ondula en una onda de luz son los campos eléctrico y magnético. Su frecuencia de oscilación es la frecuencia de la onda. **49.** La rapidez es $c$, la rapidez de la luz. **51.** De acuerdo. Ambas son ondas electromagnéticas. **53.** De acuerdo. Las ondas electromagnéticas están en todas partes. **55.** La onda más rápida tiene la longitud de onda más larga: la luz, en concordancia con la regla $\lambda = v/f$. **57.** Las ondas de radio son ondas electromagnéticas y viajan con la rapidez de la luz. (¡No confundas las ondas sonoras con las ondas de radio!) **59.** La longitud de onda más corta corresponde a una frecuencia más alta, de modo que la frecuencia de la luz azul-verdosa proveniente del láser de argón tiene una frecuencia más alta que la luz roja proveniente del láser helio-neón. **61.** El vidrio es opaco a frecuencias de luz que coinciden con sus propias frecuencias naturales. Esto se debe a que los electrones en el medio absorbente son impulsados a oscilaciones de amplitudes mucho más grandes que ocurren para frecuencias no resonantes. Estas amplitudes grandes resultan en una transferencia de energía a átomos vecinos y un aumento en energía interna y no en una reemisión de luz. **63.** Transparencia u opacidad están determinados por la coincidencia entre las frecuencias de la luz incidente y la frecuencia resonante del material. Una sustancia que es transparente a un rango de frecuencias de luz es opaca en aquellas frecuencias que coinciden con su propia frecuencia resonante. **65.** Las gafas de Sol se calentarán más en la luz solar que las gafas de lectura regulares porque las gafas para leer transmiten la mayor parte de la energía luminosa que incide sobre ellas, mientras que las gafas de Sol absorben más energía luminosa, lo que en consecuencia aumenta su energía interna. **67.** Los bastones, no los conos, responden a la luz débil, de modo que debes enfocar la luz con baja intensidad sobre una parte de la retina que está compuesta de bastones. Ésa estaría al lado de la fóvea. Si observas una estrella tenue, mira un poco al lado de donde esperas verla. **69.** No se ve color en la periferia de la visión simplemente porque no hay conos ubicados en las regiones más externas de la retina. **71.** El punto ciego se ubica en el lado de la fóvea alejado de tu nariz. **73.** En concordancia con la ley del inverso al cuadrado, el brillo del Sol es menor que 1/25 del visto desde la Tierra. **75.** Ves la galaxia como "estaba" cuando la luz la dejó, hace mucho, mucho tiempo. **77.** En la tabla de factores de conversión de los forros del libro, observa que 1 ft = 0.3048 m, de modo que 20 pies es 20 × 0.3048 m = 6.096 m. En el sistema métrico podrías esperar "visión 6/6" (redondeado).

### Piensa y discute

**79.** Puedes ver el Sol y las estrellas. **81.** El hecho de que las diferentes partes del espectro electromagnético emitidas en la explosión se reciban de forma simultánea es evidencia de la independencia de frecuencia de la rapidez de la luz. Si la rapidez de onda dependiera de la frecuencia, se recibirían diferentes frecuencias en distintos tiempos. **83.** Caminar por una habitación y detenerse para saludar a otros es análogo al modelo de transmisión de la luz en que hay una pausa con cada interacción. Sin embargo, la misma persona que comienza el camino termina el camino, mientras que en la transmisión de luz hay una secuencia de eventos "muerte-nacimiento" conforme la luz es absorbida y "nueva luz" es emitida en su lugar. La luz que al principio golpea el vidrio no es la misma luz que sale al final.

(Otra analogía es una carrera de relevos, donde el corredor que comienza la carrera no es el corredor que cruza la línea de meta.) **85.** Sí. La evidencia es un eclipse lunar, cuando la Luna pasa en la sombra de la Tierra. **87.** Durante un eclipse parcial donde se proyectan los crecientes del Sol, la Luna está parcialmente en frente del Sol. **89.** La Luna está más alejada de su distancia promedio de la Tierra, de modo que es más pequeña en el cielo. Si estuviera más cerca, la Luna se vería más grande y el Sol se bloquearía por completo cuando la Luna, el Sol y la Tierra se alinearan. **91.** Durante un eclipse lunar, los observadores en la Luna verían la Tierra en la trayectoria de la luz solar y verían un eclipse solar. Durante un eclipse solar, los observadores en la Luna verían una pequeña sombra de la Luna moverse con lentitud por toda la Tierra. La sombra consistiría en una mancha oscura (la umbra) rodeada por un círculo no tan oscuro (la penumbra). **93.** La luz proveniente del flash se dispersa vía la ley del inverso al cuadrado hacia el suelo abajo, y lo poco que regresa al avión se dispersa aún más. El pasajero descubrirá que el flash no representa ninguna diferencia en absoluto. Tomar fotografías a grandes distancias, ya sea desde un avión o desde las gradas de un estadio de fútbol, con el flash intencionalmente activado, es más bien ridículo.

## Capítulo 27

### Preguntas conceptuales

**1.** La luz azul tiene una frecuencia más alta que la luz roja. **3.** Cuando la luz cae sobre un material con una frecuencia natural coincidente, se absorbe. **5.** La luz roja se transmite a través de un vidrio rojo. **7.** Un trozo de vidrio de color absorbe luz y se calienta más rápido. **9.** La frecuencia pico de la luz solar es amarillo-verde. **11.** Una curva de radiación es una gráfica de brillo *versus* frecuencia para la luz. **13.** Estos tres colores de igual brillantez se suman para producir blanco. **15.** Rojo y cian se suman para producir blanco. **17.** Los tres primarios sustractivos son cian, amarillo y magenta (CYM). **19.** Las campanas pequeñas interactúan más con sonidos de frecuencia alta. **21.** El cielo suele parecer azul porque el extremo azul del espectro se dispersa más por la luz solar. **23.** La dispersión de luz azul de frecuencia alta ocurre en toda la trayectoria de la luz solar, de modo que la trayectoria larga al amanecer o al atardecer encuentra mucho azul faltante. Lo que queda es luz con frecuencias más bajas, lo cual explica el color rojizo del Sol en esos momentos. A mediodía la trayectoria a través de la atmósfera es más corta y ocurre menos dispersión. **25.** Una nube es blanca porque refleja por igual todos los colores de la luz solar. **27.** El agua absorbe más la luz infrarroja. **29.** Cuando el rojo no se resta, el resultado es cian.

### Piensa y realiza

**31.** ¡Intenta esto con la bandera estadounidense! **33.** ¡Esto fascinará a los escépticos!

### Piensa y explica

**35.** El rojo tiene la longitud de onda más larga; el violeta tiene la longitud de onda más corta. **37.** El recubrimiento interior absorbe en lugar de reflejar la luz y por tanto parece negro. Un interior negro en un instrumento óptico absorberá cualquier luz aislada en lugar de reflejarla y pasarla al interior del instrumento para interferir con la imagen óptica. **39.** Las pelotas de tenis son amarillo-verde para volverse más visibles; así coinciden con el color al cual son más sensibles las personas. **41.** Un trozo de papel que parezca blanco en la luz solar tiene la propiedad de reflejar cualquier color que incida sobre él. **43.** Si el vestuario amarillo de los actores se ilumina con una luz azul complementaria, parecerá negro. **45.** Rojo y verde producen amarillo; rojo y azul producen magenta; rojo, azul y verde producen blanco. **47.** Anaranjado-amarillo es complementario al azul, que se combinan a negro. Los automóviles serían difíciles de ver bajo esta luz. **49.** Se verá morado. Revisa la Figura 27.12. **51.** Profundo en el agua el rojo ya no está presente en la luz, de modo que la sangre parece negra. Pero hay mucho rojo en el flash de una cámara, de modo que la sangre parece roja cuando se ilumina de esta forma. **53.** Verde + azul = cian = blanco − *rojo*. **55.** El color reflejado es blanco menos rojo, o cian. **57.** Tales gafas eliminan la distracción que ofrecen las luces azul y violeta que se dispersan mucho más, aunque permiten al piloto ver en un rango de frecuencias donde el ojo es sensible. (Las gafas que transmiten predominantemente rojo también se desharían de las luces azul y violeta dispersadas, pero proporcionarían luz a la cual el ojo no es muy sensible.) **59.** De acuerdo. **61.** La afirmación es cierta. Un tono más positivo omitiría la palabra *sólo*, porque el atardecer no son *sólo* los colores restantes; *son* aquellos colores que no se dispersaron en otras direcciones. **63.** A través de las emisiones volcánicas, la Luna parece cian, el color complementario del rojo. **65.** La espuma está compuesta de pequeños trozos de líquido que dispersan la luz como lo hace una nube. **67.** Si la atmósfera fuese varias veces más densa, la luz solar que llegaría a la Tierra sería predominantemente de frecuencias bajas porque la mayoría de la luz azul se dispersaría. La nieve probablemente parecería anaranjada al mediodía, y de un rojo profundo cuando el Sol no estuviera directamente arriba. **69.** Los atardeceres ocurren de manera posterior a las actividades de los humanos y otras formas de vida que colocan polvo y otras partículas en el aire. De modo que la composición del cielo es más variada al atardecer.

### Piensa y discute

**71.** El cliente tiene razón cuando pide ver los colores a la luz del día. Bajo una iluminación fluorescente, con sus frecuencias predominantemente más altas, se acentuarían los colores azulados más que los colores rojizos. Los colores parecen muy diferentes en la luz solar. **73.** Los pétalos rojos de una rosa roja reflejan luz roja, mientras que las hojas verdes absorben luz roja. La energía absorbida por las hojas tiende a aumentar su temperatura. Los materiales blancos reflejan radiación y, por tanto, lo usan quienes no quieren calentarse con la absorción de energía radiante. **75.** No sólo se ve amarillo-verde, sino también rojo y azul. Todos juntos, se mezclan para producir la luz blanca que ves. Y, debido a dispersión atmosférica, el Sol es amarillento. **77.** De acuerdo, porque la "matemática de la luz" es correcta. **79.** Ves los colores complementarios por la fatiga de la retina. El azul parecerá amarillo; el rojo, cian; y el blanco, negro. ¡Pruébalo y verás! **81.** A mayores altitudes, hay menos moléculas sobre ti y, por tanto, menos dispersión de la luz solar. Esto resulta en un cielo más oscuro. El extremo, cuando no hay ninguna molécula en absoluto, resulta en un cielo negro, como en la Luna. **83.** Desde la superficie de la Luna, tanto el Sol como las estrellas son claramente visibles. Esto se debe a que no hay luz del cielo (luz solar dispersada) que supere la luz de las estrellas.

## Capítulo 28

### Preguntas conceptuales

**1.** La luz incidente pone a vibrar a los electrones. **3.** El principio de Fermat afirma que la luz tomará la trayectoria que requiera menos tiempo cuando vaya de un punto a otro. **5.** La distancia de la imagen y la distancia del objeto son iguales. **7.** Sí. Una superficie puede considerarse pulida para ondas con longitud de onda corta y no para las de onda más larga. La malla en un disco parabólico es rugosa para ondas cortas, pero no para ondas largas. **9.** Los ángulos no son iguales cuando las caras del vidrio no son paralelas, como con un prisma. **11.** Sí. La ley de reflexión se sostiene localmente en cada parte diminuta de la superficie curva, pero no en el espejo curvo como totalidad. **13.** La interacción de la luz con un material transparente reduce la rapidez de la luz en el material. **15.** La rapidez de la luz frena cuando la luz se refracta en un medio. **17.** La refracción hace que el fondo de la alberca parezca menos profundo. **19.** Cada gota dispersa un espectro de colores. **21.** Un arco secundario es más tenue debido a la reflexión interna adicional. **23.** Dentro del vidrio, la luz se refleja internamente por completo, más o menos a 43°, dependiendo del tipo de vidrio; en un diamante, 24.5°. **25.** Una lente convergente es más gruesa en medio, lo que hace que los rayos paralelos se junten en un punto. Una lente divergente es más gruesa en los bordes. **27.** Una imagen real puede proyectarse sobre una pantalla; una imagen virtual no puede proyectarse. **29.** Las pupilas pequeñas significan aberturas pequeñas, lo cual significa menos traslape de rayos fuera de foco.

### Piensa y realiza

**31.** Muchas abuelas no saben que sólo con un espejo de la mitad del tamaño pueden ver su imagen completa. **33.** Ésta es una actividad fascinante. **35.** Ésta es una actividad fascinante.

### Piensa y resuelve

**37.** Te aproximas a 4 m/s. Tú y tu imagen caminan a 2 m/s. **39.** La imagen de la mariposa está a 20 cm detrás del espejo, de modo que la distancia entre la imagen y tu ojo es 70 cm. **41.** La cantidad de luz transmitida a través de dos hojas de vidrio es aproximadamente 85%. Para ver esto, considera una intensidad incidente de 100 unidades. Entonces 92 unidades se transmiten a través del primer panel, y 92% de esta cantidad se transmite a través del segundo panel ($0.92 \times 92 = 84.6$).

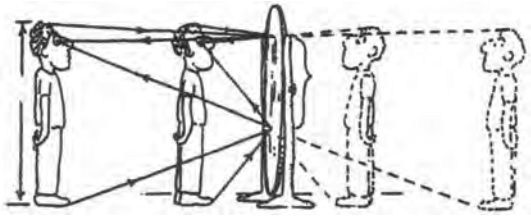
### Piensa y clasifica

**43.** A = B = C (todas iguales) **45.** B, C, A

### Piensa y explica

**47.** El pie izquierdo de Peter está firmemente plantado sobre la mesa, detrás del espejo entre sus piernas. **49.** Fred y McKenzie están entre dos espejos paralelos. La reflexión de un espejo incide sobre el otro, y así sucesivamente. Lo ideal sería que hubiera un número infinito de imágenes, pero la luz se pierde con cada reflexión. **51.** El principio de Fermat para la refracción es de tiempo mínimo, pero para reflexión también podría ser de distancia mínima. Esto es así porque la luz no cambia de medios para reflexión, de modo que no ocurre cambio en rapidez y las trayectorias de tiempo mínimo y de distancia mínima son equivalentes. Pero para la refracción, la luz pasa de un medio donde tiene cierta rapidez a otro medio donde su rapidez es diferente. Cuando esto ocurre, las trayectorias rectas de distancia mínima tardan más tiempo en viajar que las trayectorias de tiempo mínimo que no son en línea recta. Ve, por ejemplo, la diferencia en las trayectorias de distancia mínima y de tiempo mínimo en la Figura 28.13. **53.** Sí. La bala

que rebota seguirá los mismos cambios en dirección cuando cambie su cantidad de movimiento (ángulo de incidencia = ángulo de rebote), que los que sigue la luz cuando se refleja de una superficie plana. **55.** La luz que toma una trayectoria del punto A al punto B seguirá la misma trayectoria inversa al ir del punto B al punto A, incluso si está involucrada la reflexión o la refracción. De modo que si no puedes ver al conductor, el conductor no puede verte a ti. (Esta independencia de la dirección a lo largo de la trayectoria de la luz es el "principio de reciprocidad".) **57.** Dos superficies del espejo reflejan luz. La superficie frontal refleja cerca de 4% de la luz incidente, y la superficie plateada refleja la mayor parte del resto. Cuando el espejo se inclina en la posición "diurna", con el espejo inclinado hacia arriba, la luz que se refleja desde la superficie plateada se dirige arriba de la visión del conductor y el conductor ve la luz reflejada en la superficie frontal del espejo. Ese 4% de luz trasera es suficiente para la conducción nocturna. **59.** Las páginas rugosas proporcionan reflexión difusa, que puede verse desde cualquier ángulo. Si la página fuese lisa, podría verse bien sólo a ciertos ángulos. **61.** El espejo con media altura funciona a cualquier distancia, como se muestra en el dibujo. Esto es así porque, si te acercas más, tu imagen también se acerca más. Si te alejas, tu imagen hace lo mismo. Muchas personas en verdad tienen que probarlo antes de creerlo. ¡Ve la diferencia entre esto y mirar un edificio alto en un espejo de bolsillo y mirarte tú mismo en el espejo de bolsillo!



**63.** El área limpiada será la mitad de alta que tu cara. **65.** Los ojos de una persona hipermétrope parecen amplificados. **67.** De acuerdo, como lo muestra una revisión de la Figura 28.24. Observa que los frentes de onda están más juntos en el agua que en el aire arriba de ella. **69.** La luz roja viaja más rápido a través del vidrio y sale primero. **71.** La patas "no humedecibles" del insecto presionan y curvan la superficie del agua, la cual efectivamente produce una lente que dirige la luz lejos de su trayectoria para formar la región de sombra extendida. (Una observación cercana muestra un anillo brillante alrededor de la región más oscura. Es interesante que la sombra y el anillo brillante tengan la misma brillantez promedio: "conservación de luz".) **73.** La visión normal depende de la cantidad de refracción que ocurra para la luz que viaja del aire al ojo. El cambio de rapidez garantiza una visión normal. Pero si el cambio de rapidez es del agua al ojo, entonces la luz se refractará menos y resultará una imagen menos clara. Un nadador usa goggles para asegurarse de que la luz viaje del aire al ojo, incluso si está bajo el agua. **75.** El diamante centellea menos porque hay ángulos de refracción más pequeños entre el agua y el diamante. La luz ya frena cuando entra al diamante, de modo que la cantidad de más frenado, y refracción, se reduce. **77.** La imagen será un poco más tenue con colores originales, pero de otro modo no será afectada. **79.** Si la luz tuviera la misma rapidez promedio en el vidrio que en el aire, en las lentes no ocurriría refracción de la luz, y no ocurriría amplificación. La amplificación depende de la refracción, la cual a su vez depende de los cambios en rapidez. **81.** Una imagen estenopeica es clara. **83.** La imagen producida por un pequeño orificio es clara pero muy tenue, una seria desventaja para una cámara espía. Una cámara espía necesita toda la luz que pueda obtener porque la imagen está muy alargada, de modo que la luz se dispersa. En consecuencia, es conveniente una gran abertura. **85.** Para objetos muy distantes, efectivamente en el "infinito", la luz llega a foco en el plano focal del lente. De modo que la superficie fotosensible está a una longitud focal en la parte trasera de la lente para tomas muy distantes. Para distancias más cortas, está más alejada de la lente. **87.** Sí. ¡Las imágenes de hecho están de cabeza! El cerebro las vuelve a invertir. **89.** Los mapas de la Luna son vistas de cabeza de la Luna que coinciden con la imagen de cabeza que los observadores de la Luna ven en un telescopio astronómico. **91.** Las rapideces de la luz en la barra de vidrio y en el aceite son iguales. Dicho de otra manera: tanto el aceite como el vidrio tienen el mismo índice de refracción. Sólo verías la barra transparente sumergida si la luz experimentara un cambio de rapidez mientras pasara del aceite al vidrio y de vuelta al aceite. Ningún cambio en la rapidez de la luz significa que no hay evidencia visual de su presencia.

### Piensa y discute

**93.** Es más fácil de ver la superficie empedrada dispareja. La luz reflejada de vuelta desde tus faros es lo que te permite ver el camino. La superficie lisa como espejo puede reflejar más luz, pero refleja la luz hacia adelante, no hacia atrás, de modo que no ayudaría a ver. Mientras que la reflexión difusa desde un camino rugoso permite a un conductor ver el camino iluminado por los faros en una noche seca, en una noche lluviosa el camino está cubierto con agua y actúa como un espejo plano. Muy poca de la iluminación proveniente de los faros regresa al conductor y en vez de ello se refleja hacia adelante (lo que produce un brillo para los conductores que se aproximan). **95.** Ves la luz del cielo refractada hacia arriba cerca de la superficie del camino. **97.** No. En ambos casos la luz se dobla alejándose de la normal al salir del agua. Es por ello que la esquina del cuadrado sumergido parece ser menos profunda. Observa que es fácil confundir el haz de la imagen izquierda con el borde del cuadrado sumergido en la imagen de la derecha. La luz viaja *desde* el borde, no *a lo largo* del borde del cuadrado. **99.** Lanza el arpón por abajo de la posición aparente del pez, porque la refracción hace que el pez parezca más cercano a la superficie de lo que en realidad está. Pero si apuntas a un pez con un láser, no hagas ninguna corrección y sólo apúntalo directamente al pez. Eso es así porque la luz proveniente del pez que tú ves se refractó al llegar a ti, y la luz láser se refractará a lo largo de la misma trayectoria para llegar al pez. Puede ser necesaria una ligera corrección, según los colores del haz láser y del pez. **101.** Un pez ve el cielo (así como cierta reflexión del fondo) cuando mira hacia arriba a 45° porque el ángulo crítico es 48° para el agua. Si el pez mira a 48° o más sólo ve un reflejo del fondo. **103.** Cuando envíes un haz láser hacia una estación espacial, no hagas ninguna corrección y sólo apunta a la estación que ves. Esto es como apuntar al pez mientras estás en la orilla, como en la pregunta 99. La trayectoria de refracción es la misma en cualquier dirección. **105.** Cuando el Sol está alto en el cielo y las personas en el avión miran abajo, hacia una nube opuesta a la dirección del Sol, pueden ver un arcoíris que forma un círculo completo. La sombra del avión aparecerá en el centro del arco circular. Esto es así porque el avión está directamente entre el Sol y las gotas o la nube de lluvia que producen el arco. **107.** Una lupa usada como "vidrio para quemar" no hace más que reunir cierta cantidad de energía y concentrarla en cierto punto focal. La idea importante es que la lente es mucho más grande que el área superficial de la alberca y no recolecta más energía solar de la que recibe la alberca de cualquier forma. La hoja puede ayudar a calentar la alberca al evitar la evaporación, como sería el caso con cualquier cubierta, pero en ninguna forma las lentes dirigen energía solar adicional al agua de abajo. Esta publicidad fraudulenta se aprovecha de la ignorancia del público. **109.** El doblamiento es menos pronunciado porque la luz ya frenó en el agua y frena sólo un poco más en tu córnea. Es por esto por lo que los miopes ven más claro en el agua que en el aire. El índice de refracción de tu córnea está más cerca del índice del agua que el del aire. **111.** Los dos rayos son una muestra de los muchísimos rayos necesarios para producir una imagen clara. El par de rayos simplemente ubican la distancia de la imagen desde la lente.

## Capítulo 29

### Preguntas conceptuales

**1.** Todo punto en un frente de onda se comporta como una fuente de nuevas ondas, que se combinan para formar nuevos frentes de ondas. **3.** La difracción es más pronunciada a través de aberturas pequeñas. **5.** Las ondas con longitud de onda más larga se difractan más que las ondas más cortas, de modo que las ondas más largas de radio AM se difractan más. **7.** Thomas Young demostró la naturaleza ondulatoria de la luz. **9.** Una superficie ópticamente plana es aquella donde las franjas de interferencia tienen forma uniforme. **11.** La iridiscencia se produce por la interferencia de la luz. **13.** Estos colores son colores de interferencia, que resultan de la doble reflexión en dos superficies. **15.** La polarización distingue entre ondas longitudinales y transversales. **17.** Cuando los ejes se alinean, lo que pasa a través de uno pasa a través del otro. Cuando están en ángulo recto, lo que pasa por el primero es absorbido por el segundo. **19.** La luz reflejada está polarizada en la dirección de la superficie plana de reflexión. **21.** Sí. El fenómeno de paralaje subyace a la percepción profunda. **23.** Los filtros de polarización en ángulo recto mutuo proyectan un par de imágenes que se funden sobre una pantalla. Estas imágenes pueden llegar a los ojos cuando las pantallas se ven a través de filtros de polarización con el mismo ángulo recto mutuo.

### Piensa y realiza

**25.** La difracción es bastante evidente. **27.** Esta actividad revela la polarización en el cielo.

### Piensa y explica

**29.** La Tierra intercepta una fracción tan pequeña de la onda esférica en expansión proveniente del Sol que puede aproximarse como una onda plana (como una porción pequeña de la superficie esférica de la Tierra puede aproximarse como plana). Las ondas esféricas provenientes de una lámpara cercana tienen curvatura considerable. (Observa las Figuras 29.3 y 29.4.) **31.** Las longitudes de onda de las ondas de radio AM tienen cientos de metros, mucho más grandes que el tamaño de los edificios, de modo que se difractan con facilidad alrededor

de los edificios. Las longitudes de onda FM tienen pocos metros, apenas para la difracción alrededor de edificios. La luz, con longitudes de onda de una pequeña fracción de centímetro, no muestra difracción apreciable alrededor de edificios. **33.** Deben diferir por media longitud de onda, o un número impar de media longitud de onda. **35.** La luz azul producirá franjas con más espaciamiento. **37.** Resultará una interferencia destructiva. **39.** Las franjas se acercan más conforme las rendijas se separan más. (Observa esto en las fotografías de la Figura 29.14). **41.** Refracción: arcoíris. Reflexión selectiva: pétalos de flor. Interferencia en una película delgada: pompas de jabón. **43.** Los colores de interferencia resultan de las reflexiones dobles en las superficies superior e inferior del delgado recubrimiento transparente sobre las alas de la mariposa. Algunas otras alas de mariposa producen colores por difracción, donde crestas en la superficie actúan como rejillas de difracción. **45.** Ocurre interferencia de luz desde las superficies superior e inferior de la película jabonosa o de detergente. **47.** La luz proveniente de un par de estrellas no producirá un patrón de interferencia porque las ondas de luz de las dos fuentes separadas son incoherentes; cuando se combinan, se emborronan. La interferencia ocurre cuando la luz proveniente de una sola fuente se divide y recombina. **49.** Azul, el color complementario, se transmite. El azul es blanco menos la luz amarilla que se ve arriba. (Observa que este ejercicio se remite a información en el Capítulo 27.) **51.** La polarización es una propiedad de las ondas transversales. A diferencia de la luz, el sonido es una onda longitudinal y no puede polarizarse. De hecho, ya sea que una onda pueda o no polarizarse, es una de las pruebas para distinguir las ondas transversales de las ondas longitudinales. **53.** Si el filtro se alinea con la polarización de la luz, toda la luz pasa a través de él. Si se alinea perpendicular a la polarización de la luz, ninguna pasa. A cualquier otro ángulo, parte de la luz pasa porque la luz polarizada puede "descomponerse" (como un vector) en componentes paralelo y perpendicular a la alineación del filtro. **55.** Puedes determinar el eje de polarización al ver el destello desde una superficie plana, como en la Figura 29.34. El destello es más intenso cuando el eje de polarización es paralelo a la superficie plana. **57.** El eje del filtro debe ser vertical y no permitir el paso del destello, que es paralelo al plano del suelo: horizontal. **59.** Puedes determinar que el cielo está parcialmente polarizado si giras una sola hoja de Polaroid enfrente de tu ojo mientras ves el cielo. Observarás que el cielo se oscurece cuando el eje del Polaroid es perpendicular al eje de polarización de la luz del cielo. **61.** La interferencia es central para la holografía.

### Piensa y discute

**63.** La luz roja con longitud de onda más larga producirá franjas más espaciadas. **65.** La mancha será brillante debido a la interferencia constructiva. **67.** El problema es serio: dependiendo de la orientación del eje de polarización de la pantalla y las gafas, no podría verse la pantalla.

## Capítulo 30

### Preguntas conceptuales

**1.** A estas frecuencias altas, se emite luz ultravioleta. **3.** Los electrones en las capas electrónicas exteriores tienen más energía potencial. **5.** Son iguales. **7.** La luz azul tiene tanto una frecuencia más alta como mayor energía por fotón. **9.** Los colores indican los varios átomos que experimentan excitación. **11.** Un espectroscopio es un aparato que mide las frecuencias de la luz en un haz de luz. **13.** La relación es $\overline{f} = T$ (también estudiada en el Capítulo 16). **15.** Las líneas de Fraunhofer son líneas de absorción espectral en el espectro solar. **17.** Hay más energía por fotón en la luz ultravioleta. **19.** Un estado metaestable es un estado prolongado de excitación. **21.** La excitación primaria es mediante un impacto de electrones; la secundaria es mediante un impacto de fotones. **23.** Un LED dura incluso más tiempo que una bombilla incandescente. **25.** La luz coherente es de fotones que tienen una sola frecuencia que está en fase mutua. La luz solar, por el contrario, es luz incoherente.

### Piensa y realiza

**27.** ¡La abuela ha visto este avance de las lámparas!

### Piensa y resuelve

**29.** (a) La transición de B a A, tiene el doble de energía y el doble de frecuencia que la transición C a B. En consecuencia, tiene la mitad de la longitud de onda, o 300 nm. Dado que $c = f\lambda$, $\lambda = c/f$. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia, de modo que el doble de frecuencia significa la mitad de la longitud de onda. (b) La transición de C a A tiene tres veces la energía y tres veces la frecuencia de la transición de C a B. Por tanto, tiene un tercio la longitud de onda, o 200 nm.

### Piensa y explica

**31.** Los niveles de energía son diferentes de los átomos y las moléculas de diferentes materiales, de ahí las diferentes frecuencias de radiación emitida cuando ocurre excitación. Diferentes colores corresponden a diferentes cambios de energía y frecuencias. **33.** Más energía se asocia con cada fotón de luz ultravioleta que con un fotón de luz visible. El fotón ultravioleta con mayor energía puede causar cambios químicos que producen una quemadura solar en la piel, cosa que un fotón visible no puede hacer. **35.** Un tubo de neón no se "agota" de átomos que excitar porque sus átomos se excitan una y otra vez, sin la necesidad de átomos "nuevos". **37.** Las "líneas" espectrales serían puntos redondos. Líneas muy cercanas serían más fáciles de discernir que los puntos que se pudieran traslapar. Además, si el diámetro del agujero se hiciera tan pequeño como el ancho de la rendija, pasaría insuficiente luz. Por ende, las imágenes de una rendija son superiores. **39.** Cuando un espectro del Sol se compara con el espectro del elemento hierro, las líneas de hierro se traslapan y coinciden perfectamente con ciertas líneas de Fraunhofer. Esto es evidencia de la presencia de hierro en el Sol. **41.** Los patrones de líneas espectrales que aparecen en la luz de las estrellas también aparecen en los espectros de elementos de la Tierra. Debido a que los espectros de luz provenientes de estrellas distantes coinciden con los espectros de elementos en la Tierra, se concluye que el planeta y el Universo observable tienen las mismas "huellas" y están hechos de la misma materia. **43.** Las estrellas son fuentes incandescentes, donde la frecuencia de radiación pico es proporcional a la temperatura estelar. Pero la luz proveniente de los tubos de descarga de gas no es función de las temperaturas del gas; depende de los estados de excitación en el gas. Estos estados no dependen de la temperatura del gas y pueden ocurrir ya sea que el gas esté caliente o frío. **45.** La excitación atómica ocurre en sólidos, líquidos y gases. Puesto que los átomos en un sólido están estrechamente empacados, la radiación que proviene de ellos (y de los líquidos) se corre en una amplia distribución para producir un espectro continuo, mientras que la radiación proveniente de átomos muy espaciados en un gas está en montones separados que producen "líneas" discretas cuando se difracta mediante una rejilla. **47.** Cuando los átomos de tungsteno están estrechamente empacados en un sólido, los niveles de energía de las capas electrónicas exteriores, que por lo demas están bien definidos, se extienden por interacciones mutuas entre los átomos vecinos. El resultado es una banda de energía compuesta de miríadas de niveles distintos muy juntos. Puesto que existen aproximadamente tantos de estos niveles distintos como hay átomos en la estructura cristalina, la banda no puede distinguirse a partir de una dispersión continua de energías. **49.** La luz que se absorbe es parte de un haz. La luz que de hecho se reemite marcha en todas direcciones, con muy poco a lo largo de la dirección del haz que ilumina. En consecuencia, dichas regiones del espectro son oscuras. **51.** (a) Se observa un "espectro de absorción", con ciertas líneas oscuras en un fondo de luz continua. (b) El "espectro de emisión" contiene algunas líneas brillantes, cuya mayoría coincide con las líneas del espectro de absorción. **53.** La fluorescencia requiere que los fotones de luz que inician el proceso tengan más energía que los fotones de luz emitida. Si se emitiera luz visible, entonces los fotones infrarrojos de menor energía no podrían iniciar el proceso. **55.** Los diferentes colores emitidos por los minerales fluorescentes corresponden a diferentes moléculas con diferentes conjuntos de estados energéticos. En consecuencia, dichos minerales pueden distinguirse visualmente. **57.** La iluminación mediante luz de menor frecuencia no tiene fotones suficientemente energéticos como para excitar los átomos. Por el contrario, la iluminación con luz ultravioleta sí tiene suficiente energía para expulsar los electrones, lo que deja ionizados a los átomos en el material. Impartir diferentes energías produce diferentes resultados. **59.** Los LED tienen vidas más largas que las CFL y las lámparas incandescentes, lo que reduce los costos de mantenimiento. **61.** Los LED probablemente predominarán debido a que tienen vidas más largas y no tienen mercurio. **63.** Los fotones provenientes de la lámpara de destello deben tener al menos tanta energía como los fotones que pretenden producir en el láser. Los fotones rojos tienen menos energía que los fotones verdes, de modo que no serían suficientemente energéticos como para estimular la emisión de fotones verdes. Los fotones verdes energéticos pueden producir fotones rojos menos energéticos, pero no al revés. **65.** Si el estado metaestable no tuviese una vida relativamente larga, no habría suficiente acumulación de átomos en este estado excitado para producir la "inversión de población" que es necesaria para la acción láser. **67.** La afirmación de tu amigo viola la ley de conservación de la energía. Un láser, o cualquier dispositivo, no puede producir más energía de la que se le pone. La potencia, por otra parte, es otra historia. **69.** $\overline{f}$ es la frecuencia pico de la radiación incandescente; esto es, la frecuencia a la cual la radiación es más intensa. $T$ es la temperatura Kelvin del emisor. **71.** Sí. Ambos radian energía, pero debido a que las temperaturas son diferentes, el Sol más caliente emite frecuencias de luz más altas que la Tierra, y con mucha mayor intensidad. **73.** Todos los cuerpos no sólo radian energía, sino que también la absorben. Si radiación y absorción ocurren a tasas iguales, no hay cambio en la temperatura. **75.** La temperatura es más baja para las estrellas rojizas, media para las estrellas blanquecinas y más caliente para las azuladas. **77.** El espectro solar es un espectro de absorción, con líneas oscuras llamadas líneas de Fraunhofer en honor de Joseph von Fraunhofer, quien las descubrió. **79.** La energía se conserva, y la frecuencia es proporcional a la energía de un fotón. De modo que la suma de las dos frecuencias es igual a la frecuencia de la luz emitida en la transición del nivel

cuántico 4 al estado base, nivel cuántico 1. **81.** Sólo resultarían tres: una del 4 al base, una del 3 al base, y una del 2 al base. La transición del 4 al 3 involucraría la misma diferencia en energía y sería indistinguible de la transición de 3 a 2, o de 2 al base. Del mismo modo, la transición de 4 a 2 tendría el mismo cambio en energía que la transición de 3 al base.

### Piensa y discute

**83.** El calentamiento continuo de un pedazo de metal al rojo vivo aumentará la frecuencia pico en medio del espectro visible, y brillará al rojo blanco (porque todas las frecuencias visibles están presentes). Ve la curva de radiación en la Figura 30.7. El calentamiento continuo aumentará la frecuencia pico en la parte ultravioleta del espectro, y parte de él permanece en el azul y el violeta. De modo que sí: puedes calentar un metal hasta que se ponga "rojo azul". (La razón por la que no puedes ver el metal al "rojo azul" es porque el metal se vaporizará antes de que pueda tener brillo azul. Sin embargo, muchas estrellas tienen brillo azul.) **85.** Una estrella con su frecuencia pico en el ultravioleta emite suficiente luz en la parte de frecuencia más alta del espectro visible para parecer "rojo violeta". Si fuese más fría, todas las frecuencias estarían más equilibradas en intensidad, lo cual las haría ver más blancas.

## Capítulo 31

### Preguntas conceptuales

**1.** Los tres apoyaron la teoría ondulatoria. **3.** Planck consideró que la energía de los átomos en vibración, no la luz, estaba cuantizada. **5.** Sí. En general, $f$ representa la frecuencia. **7.** Los fotones de luz violeta tienen más energía y, por tanto, tienen más éxito para desalojar electrones. **9.** Las fotografías están compuestas de pequeñas unidades. **11.** La luz viaja en una forma ondulatoria de una ubicación a otra. **13.** La luz se comporta como una onda en tránsito, como una partícula cuando se absorbe. **15.** Al viajar a través de rendijas, la luz actúa en forma ondulatoria; golpea la pantalla como partícula. El patrón de golpes es ondulatorio. **17.** El producto $\Delta p \Delta x$ es mayor que o igual a $h$-barra. **19.** Como con la cantidad de movimiento, sólo una u otra pueden ser precisas. **21.** Los aspectos de onda y partícula, tanto de la materia como de la radiación, son partes necesarias y complementarias del todo.

### Piensa y resuelve

**23.** Frecuencia es rapidez/longitud de onda: $f = (3 \times 10^8 \text{ m/s})/(2.5 \times 10^{-2} \text{ m}) = 1.2 \times 10^{10}$ Hz. La energía del fotón es constante de Planck × frecuencia: $E = hf = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J·s})(1.2 \times 10^{10} \text{ Hz}) = 8.0 \times 10^{-24}$ J. **25.** La cantidad de movimiento de la bola es $mv = (0.1 \text{ kg})(0.001 \text{ m/s}) = 1.0 \times 10^{-4}$ kg·m/s, de modo que su longitud de onda de De Broglie es $h/p = (6.6 \times 10^{-34} \text{ J·s})/(1.0 \times 10^{-4} \text{ kg·m/s}) = 6.6 \times 10^{-30}$ m. Este valor es increíblemente pequeño con relación incluso a la pequeña longitud de onda del electrón. No hay posibilidades de poner a rodar una bola tan lento que su longitud de onda pueda verse.

### Piensa y explica

**27.** La física clásica es principalmente la física conocida antes de 1900 que incluye el estudio del movimiento en concordancia con las leyes de Newton y el estudio del electromagnetismo en concordancia con las leyes de Maxwell. La mecánica clásica, con frecuencia llamada mecánica newtoniana, se caracteriza por la predictibilidad absoluta. Después de 1900, los científicos descubrieron que las reglas newtonianas simplemente no se aplican en el dominio de lo muy pequeño: lo submicroscópico. Éste es el dominio de la física cuántica, donde las cosas son "granulosas" y donde los valores de energía y cantidad de movimiento (así como de masa y carga) ocurren en trozos, o cuantos. En este dominio, partículas y ondas se funden y las reglas básicas son reglas de probabilidad, no certezas. La física cuántica es diferente y no fácil de visualizar como la física clásica. No obstante, uno tiende a imprimir los modelos clásicos de onda y partícula en los hallazgos con la intención de visualizar este mundo subatómico. **29.** En concordancia con $E = hf$, la energía de un fotón con el doble de frecuencia tiene el doble de energía. Los fotones violeta son aproximadamente el doble de energéticos que los fotones rojos. **31.** No tiene sentido hablar de fotones de luz blanca porque la luz blanca es una mezcla de varias frecuencias y, por tanto, una mezcla de muchos fotones. Un fotón de luz blanca no tiene significado físico. **33.** Dado que la luz roja porta menos energía por fotón, y ambos haces tienen la misma energía total, debe haber más fotones en el haz de luz roja. **35.** No es la energía total en el haz de luz la que causa la expulsión de los electrones, sino la energía por fotón. En consecuencia, algunos fotones azules pueden desalojar algunos electrones, mientras que hordas de fotones rojos de baja energía no pueden desalojar ninguno. Los fotones actúan de manera individual, no en concierto. **37.** Los protones se mantienen en el interior de los núcleos en la profundidad de los átomos. Para expulsar un protón de un átomo se necesita aproximadamente un millón de veces más energía que para expulsar un electrón. De modo que uno necesitaría un fotón de rayo gamma de alta energía en lugar de un fotón de luz visible para producir un efecto "fotoprotónico". **39.** Algunas puertas automáticas utilizan un haz de luz que brilla de manera continua sobre un fotodetector. Cuando caminas y atraviesas el haz de luz, bloqueas el haz y cesa la generación de corriente en el fotodetector. Este cambio de corriente activa entonces la apertura de la puerta. **41.** El efecto fotoeléctrico es descargar la bola. Algunos de los electrones en exceso se "sacan" de la bola por la luz ultravioleta. Esto descarga la bola. Sin embargo, si la bola tiene carga positiva, ya tiene una deficiencia de electrones, y sacar más tiende a aumentar la carga en lugar de reducirla. (Menos electrones se desalojan con luz ultravioleta de la bola positiva que de la bola negativa. ¿Puedes ver por qué?) **43.** La luz que se refracta a través del sistema de lentes se comprende desde el modelo ondulatorio de la luz, y su llegada punto por punto para formar la imagen se comprende desde el modelo corpuscular de la luz. ¿Cómo puede ser esto? Se ha tenido que concluir que incluso cada fotón tiene propiedades ondulatorias. Éstas son ondas de probabilidad que determinan dónde es o no probable que vaya un fotón. Estas ondas interfieren de maneras constructiva y destructiva en diferentes posiciones de la película, de modo que los puntos de impacto de fotones están en concordancia con la probabilidad determinada por las ondas. **45.** Un fotón se comporta como una onda cuando está en tránsito y como una partícula cuando se emite o absorbe. **47.** El microscopio electrónico aprovecha la naturaleza ondulatoria de los electrones. **49.** El fotón pierde energía, de modo que su frecuencia disminuye. (En realidad se dice que un fotón se absorbe y otro fotón se emite, uno con menor energía.) **51.** Obviamente la bala de cañón tiene mayor cantidad de movimiento que el proyectil de la carabina de aire que viaja con la misma rapidez, de modo que, en concordancia con la fórmula de De Broglie, el proyectil de la carabina de aire tiene la longitud de onda más larga. (Ambas longitudes de onda son muy pequeñas como para medirse.) **53.** Los protones con la misma rapidez que los electrones tendrían más cantidad de movimiento, y por tanto longitudes de onda más cortas, y en consecuencia menos difracción. La difracción es una ventaja para las ondas de radio con longitud de onda larga, que les ayuda a librar obstrucciones, pero es un inconveniente en los microscopios, donde vuelven las imágenes difusas. ¿Por qué no hay microscopios protónicos? Los hay; se les llama aceleradores atómicos. La alta cantidad de movimiento de los protones con alta velocidad permite la extracción de información detallada de la estructura nuclear, e ilumina un dominio mucho más pequeño que el tamaño de un solo átomo. **55.** Si alguien observa un electrón en la punta de tu nariz con un haz de electrones o un haz de luz, entonces su movimiento, así como el de los electrones circundantes, se alterará. Aquí se adopta la opinion de que observar pasivamente la luz después de que se refleja de un objeto no altera los electrones en el objeto. Se distingue entre observación pasiva y sondeo. El principio de incertidumbre se aplica al sondeo, no a la observación pasiva. (Sin embargo, esta opinión no la sostienen algunos físicos que afirman que cualquier medición, pasiva o de sondeo, altera lo que se mide al nivel cuántico. Estos físicos argumentan que la observación pasiva proporciona conocimiento, y que sin este conocimiento, el electrón puede hacer algo más o puede hacer una mezcla, una superposición, de otras cosas.) **57.** El principio de incertidumbre de Heisenberg se aplica *sólo* a fenómenos cuánticos. Sin embargo, sirve como metáfora popular para el dominio macro. Así como la forma en que se mide afecta lo que se mide, la forma en que se frasea una pregunta a menudo influye la respuesta que se obtiene. De modo que, en varios sentidos, se altera lo que se quiere medir en una encuesta de opinión pública. Si bien existen incontables ejemplos de alteración de las circunstancias cuando se miden, el principio de incertidumbre sólo tiene significado en el mundo submicroscópico. **59.** El principio de incertidumbre se refiere sólo al reino cuántico, no al mundo macro. El aire que escapa de un neumático es un evento del mundo macro. **61.** A menos que el término se refiera a fuga hacia un reino completamente diferente, no, porque un salto cuántico es la transición *más pequeña* que algo puede experimentar.

### Piensa y discute

**63.** Encontrar materiales que respondieran fotoeléctricamente a la luz roja era difícil porque los fotones de luz roja tienen menos energía para la producción de imágenes que los fotones de luces verde o azul. **65.** La energía de la luz roja es muy baja por fotón para disparar la reacción química en los cristales fotográficos. Luz muy brillante simplemente significa que hay más fotones que no pueden disparar una reacción. La luz azul, por otra parte, tiene suficiente energía por fotón para disparar una reacción. La luz azul muy tenue dispara menos reacciones sólo porque están involucrados menos fotones. Es más seguro tener luz roja brillante que luz azul tenue. **67.** Habrá colores hacia el extremo rojo del espectro, donde el medidor no mostrará lectura, pues no se expulsan electrones. A medida que el color cambia hacia el azul y el violeta, llegará un punto en el cual el medidor comenzará a ofrecer una lectura. Si un color para el cual el medidor lee cero se vuelve más intenso, el medidor continuará marcando cero. Si un color para el cual el medidor muestra una lectura se vuelve más intenso, la corriente registrada por el medidor aumentará conforme más electrones se expulsen. **69.** El protón más masivo tiene mayor cantidad de movimiento, mientras que el electrón con su cantidad de

movimiento más pequeña tiene la longitud de onda más larga. **71.** Conforme aumenta la velocidad, aumenta la cantidad de movimiento, de modo que, por la fórmula de De Broglie, la longitud de onda del protón se vuelve más corta. **73.** La constante de Planck sería muchísimo mayor que su valor actual. **75.** No se sabe si un electrón *es* una partícula o una onda; se sabe que *se comporta* como una onda cuando se mueve de un lugar a otro y se comporta como partícula cuando incide sobre un detector. La suposición innecesaria es que un electrón debe *ser* una partícula *o* una onda. Es común escuchar a algunas personas decir que algo debe ser o esto o aquello, como si no pudiera ser ambos (como quienes dicen que uno debe elegir entre evolución biológica *o* la existencia de un ser supremo).

### Capítulo 32

#### Preguntas conceptuales

**1.** La mayoría de las partículas permanecía sin desviación debido al espacio vacío en el interior de los átomos. **3.** Franklin postuló que la electricidad es un fluido eléctrico que fluye de un lugar a otro. **5.** La desviación del rayo indica la presencia de una carga eléctrica. **7.** Millikan descubrió la masa y la carga del electrón. **9.** Rydberg y Ritz descubrieron que la frecuencia de una línea espectral en el espectro de un elemento es igual a la suma o diferencia de otras dos líneas espectrales. **11.** Sí, si existe al menos un estado energético intermedio hacia el cual pueda transitar el electrón en su camino. **13.** Las circunferencias de las órbitas son discretas porque se componen de longitudes enteras particulares del electrón. **15.** Los electrones no caen en espiral hacia el núcleo porque están compuestos de ondas que se refuerzan a ellas mismas. **17.** La función de densidad de probabilidad es el cuadrado de la función de onda. **19.** Lo que corresponde es el traslape entre las teorías nueva y anterior, si la teoría nueva es válida.

#### Piensa y explica

**21.** Los fotones provenientes de la lámpara ultravioleta tienen mayores frecuencias, energía y cantidad de movimiento. Sólo la longitud de onda es mayor para los fotones emitidos desde el transmisor de televisión. **23.** Una pequeña fracción de las partículas alfa se desvía (dispersa) a través de un ángulo grande, lo que indica un campo eléctrico tan intenso dentro del átomo que la carga positiva debe concentrarse en un pequeño núcleo central, un núcleo que es masivo, así como pequeño, porque las partículas alfa rebotadas no mostraron una pérdida importante de energía cinética. **25.** Los experimentos de Rutherford demostraron que la carga positiva debe concentrarse en un pequeño núcleo, el núcleo atómico. **27.** La misma cantidad de energía se necesita para regresar el electrón que se dio al fotón cuando cayó al estado base. **29.** La órbita más pequeña es aquella que tiene una circunferencia igual a una longitud de onda, de acuerdo con el modelo de De Broglie. **31.** Si consideras que los electrones orbitan el núcleo en ondas estacionarias, entonces la circunferencia de estos patrones ondulatorios debe ser un número entero de longitudes de onda. De esta forma las circunferencias y también los radios de las órbitas son discretos. (En un modelo ondulatorio más depurado, existen ondas estacionarias en las direcciones radial y orbital.) **33.** La frecuencia de todo fotón se relaciona con su energía mediante $E = hf$, de modo que si dos frecuencias suman lo mismo que una tercera frecuencia, dos energías suman lo mismo que una tercera energía. En la transición de salto de rana, como la que ocurre desde el tercero al primer nivel de energía en la Figura 32.10, la conservación de la energía exige que la energía emitida sea la misma que la suma de las energías emitidas para la cascada de las dos transiciones. Por tanto, la frecuencia para la transición de salto de rana es la suma de las frecuencias para las dos transiciones en la cascada. **35.** La interferencia constructiva para formar una onda estacionaria requiere un número entero de longitudes de onda alrededor de una circunferencia. Cualquier número de longitudes de onda de De Broglie no igual a un número entero conduciría a una interferencia destructiva, lo que evitaría la formación de una onda estacionaria. **37.** La respuesta a ambas preguntas es sí. Debido a que una partícula tiene propiedades ondulatorias y una longitud de onda relacionada con su cantidad de movimiento, puede mostrar las mismas propiedades que otras ondas, incluidas difracción e interferencia. **39.** Sí. Puedes ver esto a partir de la ecuación de De Broglie (longitud de onda = $h$/cantidad de movimiento), donde, si $h$ fuese más grande para una cantidad de movimiento dada, las longitudes de onda de las ondas estacionarias que constituyen las capas electrónicas sería más grande, y en consecuencia, los átomos serían más grandes. **41.** Ambos son consistentes. El principio de correspondencia exige concordancia de los resultados cuántico y clásico cuando la "granulosidad" del mundo cuántico no es importante, pero permite desacuerdo cuando la granulosidad es dominante. **43.** El principio de correspondencia de Bohr dice que la mecánica cuántica se debe traslapar y concordar con la mecánica clásica en el dominio donde la mecánica clásica ha mostrado ser válida. **45.** Es la naturaleza ondulatoria de la materia la que mantiene a los átomos separados y le brinda volumen a la materia en el mundo a tu alrededor. De otro modo, todo colapsaría y no habría materia como se le conoce. **47.** Respuesta abierta.

#### Piensa y discute

**49.** Los electrones pueden ser impulsados hacia muchos niveles de energía y, en consecuencia, pueden realizar muchas combinaciones de transiciones hacia el nivel base y los niveles intermedios. La gran variedad de transiciones produce el gran número de líneas espectrales en un espectroscopio. Incluso el hidrógeno, con un solo electrón, tiene muchas líneas, la mayoría de las cuales están en el ultravioleta y el infrarrojo. **51.** Los electrones tienen una masa definida y una carga definida, y en ocasiones pueden detectarse en puntos específicos, por lo que se dice que tienen propiedades de partícula; los electrones también producen efectos de difracción e interferencia, por lo que se dice que tienen propiedades ondulatorias. Sólo existe contradicción si uno insiste en que el electrón puede tener sólo propiedades de partícula *o* sólo de onda. Los investigadores descubrieron que los electrones muestran propiedades tanto de partícula como de onda. **53.** Einstein pensaba que la mecánica cuántica no era fundamental, pero que todavía había fundamentos que descubrir.

### Capítulo 33

#### Preguntas conceptuales

**1.** Roentgen descubrió la emisión de un "nuevo tipo de rayos". **3.** Becquerel descubrió que el uranio emite un nuevo tipo de radiación penetrante. **5.** Los rayos gamma no tienen carga eléctrica. **7.** Un rad es una unidad de energía absorbida. Un rem es una medida de radiación con base en el daño potencial (**r**oentgen **e**quivalente en hu**m**ano). **9.** Sí. El potasio radiactivo está en todos los seres humanos. **11.** Protones y neutrones son dos nucleones diferentes. **13.** Dado que la fuerza fuerte es de corto alcance, los protones en un núcleo grande están más separados en promedio que en un núcleo pequeño, y la fuerza fuerte es menos efectiva entre los protones muy separados. **15.** Los núcleos grandes contienen un mayor porcentaje de neutrones. **17.** La vida media de Ra-226 es 1,620 años. **19.** Un contador Geiger percibe radiación por ionización. **21.** La transmutación es el cambio de un elemento a otro elemento. **23.** Cuando el torio emite una partícula beta, transmuta a un elemento con un número atómico que aumenta en 1, a un número atómico de 91. **25.** Cuando un núcleo emite una partícula alfa, el número atómico disminuye en 2. Para la emisión de una partícula beta, el número atómico aumenta en 1. Para la emisión gamma, no hay cambio en número atómico. **27.** Ernest Rutherford, en 1919, fue el primero en transmutar elementos de manera intencional. **29.** La mayor parte del carbono que ingieres es carbono-12.

#### Piensa y realiza

**31.** El punto es que la radiactividad no es algo nuevo, sino que es parte de la naturaleza.

#### Piensa y resuelve

**33.** La vida media del material es de 2 horas. Un poco de razonamiento mostrará que 160 dividido a la mitad cuatro veces es igual a 10. De modo que hubo cuatro periodos de vida media en las 8 horas, y 8 horas/4 = 2 horas. **35.** A las 3:00 p.m. han transcurrido nueve horas. Esto es 9/1.8 = 5 vidas medias. De modo que (1/2) × (1/2) × (1/2) × (1/2) × (1/2) = 1/32 la cantidad original, o 0.0313 miligramos. A medianoche, 18 horas después, 18/1.8 = 10 vidas medias transcurridas. $(1/2)^{10}$ es aproximadamente 1/1,000 del original, o más o menos 0.001 miligramos. Si el hospital necesita F-18 al día siguiente, debe producirlo a la mañana siguiente. **37.** En el tanque hay 500 galones porque, después de mezclar, el galón que extrajiste tiene 10/5,000 = 1/500 de las partículas radiactivas originales en ella.

#### Piensa y clasifica

**39.** (a) B = C, A; (b) C, A = B; (c) B = C, A

#### Piensa y explica

**41.** Kelvin no sabía del decaimiento radiactivo, una fuente de energía para mantener a la Tierra caliente durante miles de millones de años. **43.** La radiación gamma está en la forma de ondas electromagnéticas, mientras que la radiación alfa y beta consiste en partículas que tienen masa. **45.** Es imposible que un núcleo de hidrógeno expulse una partícula alfa porque una partícula alfa está compuesta de cuatro nucleones: dos protones y dos neutrones. Es igualmente imposible que un melón de 1 kg se desintegre en cuatro melones de 1 kg. **47.** La partícula alfa tiene el doble de carga, pero casi 8,000 veces la inercia (dado que cada uno de los cuatro nucleones tiene casi 2,000 veces la masa de un electrón). De modo que la masa mucho mayor de las partículas alfa compensa por demás su carga doble y rapidez más baja. **49.** La radiación alfa reduce el número atómico del elemento emisor en 2 y el número de masa atómica en 4. La radiación beta aumenta el número atómico de un elemento en 1 y no afecta el número de masa atómica. La radiación gamma no afecta el número atómico o el número de masa atómica. De modo que la radiación alfa resulta en el cambio más grande tanto en número atómico como en número de masa. **51.** La radiación gamma predomina dentro del elevador cerrado porque la estructura del elevador blinda contra partículas alfa y beta mejor

que contra fotones de rayos gamma. **53.** Una partícula alfa experimenta una aceleración debida a la repulsión eléctrica mutua en cuanto está fuera del núcleo y lejos de la fuerza nuclear de atracción. Esto se debe a que tiene el mismo signo de carga que el núcleo. Cargas iguales se repelen. **55.** Puesto que tiene el doble de carga que una partícula beta, una partícula alfa interactúa más fuertemente con los electrones atómicos y pierde energía más rápido al ionizar a los átomos. (La menor rapidez de la partícula alfa también contribuye a su capacidad para ionizar átomos de manera más efectiva.) **57.** Dentro del núcleo atómico, la fuerza nuclear fuerte es la que mantiene unidos los nucleones, y la fuerza eléctrica es la que repele mutuamente a los protones y los separa. **59.** Sí, ¡de hecho! **61.** Las propiedades químicas tienen que ver con la estructura electrónica, que está determinada por el número de protones en el núcleo, no por el número de neutrones. **63.** La trayectoria en espiral de las partículas cargadas en una cámara de burbujas es resultado de enlentecimiento de las partículas debido a las colisiones con los átomos, en general hidrógeno, en la cámara. Las partículas cargadas con movimiento más lento se doblan más en el campo magnético de la cámara y sus trayectorias se vuelven espirales. Si las partículas cargadas se movieran sin resistencia, sus trayectorias serían círculos o hélices. **65.** La masa del elemento es 157 + 100 = 257. Su número atómico es 100, de modo que es el elemento transuránico llamado fermio, en honor de Enrico Fermi. **67.** Después de que el núcleo de polonio emite una partícula beta, el número atómico aumenta por 1 para convertirse en 85, y el número de masa atómica no cambia de 218. **69.** Ambos tienen 92 protones, pero el U-238 tiene más neutrones que el U-235. **71.** Un elemento puede decaer a un elemento con un número atómico más alto al emitir electrones (rayos beta). Cuando esto ocurre, un neutrón en el núcleo se convierte en protón y el número atómico aumenta en 1. **73.** No. Cuando un núcleo de fósforo (número atómico 15) emite un positrón (un electrón con carga positiva), la carga del núcleo atómico disminuye en 1, lo que lo convierte en el núcleo del elemento silicio (número atómico 14). **75.** Si los núcleos estuvieran compuestos de igual número de protones y electrones, los núcleos no tendrían carga neta. No conservarían electrones en órbita. El hecho de que los átomos tengan un núcleo positivo y electrones en órbita contradice la afirmación de tu amigo. **77.** De acuerdo con tu amigo, quien ve que el gas helio son partículas alfa. Es cierto: las partículas alfa emitidas por isótopos radiactivos en la base frenan y se detienen, capturan dos electrones y se convierten en átomos de helio. Los suministros de helio provienen del subsuelo. Cualquier helio en la atmósfera pronto se disipa hacia el espacio. **79.** La energía natural de la Tierra, que calienta el agua en los manantiales termales, es la energía del decaimiento radiactivo. Así como un pedazo de material radiactivo es más caliente que sus alrededores debido a la agitación térmica del decaimiento radiactivo, el interior de la Tierra igualmente es más caliente. En consecuencia, la gran radiactividad en el interior de la Tierra calienta el agua, pero no hace que el agua sea radiactiva. El calor de los manantiales termales es uno de los "efectos más agradables" del decaimiento radiactivo. **81.** Los huesos de dinosaurio son demasiado antiguos para la datación con carbono, porque después de ese largo lapso de tiempo queda muy poco carbono-14 en los huesos. **83.** Las tablillas de piedra no pueden datarse con la técnica de datación con carbono. La piedra no ingiere carbono ni transforma dicho carbono mediante decaimiento radiactivo. La datación con carbono funciona para materiales orgánicos.

### Piensa y discute

**85.** A partir de su nacimiento, una población humana tiene cierta vida media, el tiempo hasta que la mitad muere, pero esto no significa que la mitad de quienes todavía viven morirán en el siguiente igual intervalo de tiempo. Para los átomos radiactivos, la posibilidad de "morir" (experimentar decaimiento) siempre es la misma, sin importar la edad del átomo. Un átomo joven y un átomo viejo del mismo tipo tienen exactamente la misma posibilidad de decaer en el siguiente igual intervalo de tiempo. Esto no es así con los humanos, para quienes la posibilidad de morir aumenta con la edad. **87.** Los elementos abajo del uranio en número atómico con vidas medias cortas existen como el producto del decaimiento radiactivo del uranio u otro elemento con muy larga vida, el torio. Para los miles de millones de años que duran el uranio y el torio, los elementos más ligeros se renuevan de manera constante. **89.** Los alimentos irradiados no se vuelven radiactivos como resultado de ser tratados con rayos gamma. Esto es así porque los rayos gamma carecen de la energía para iniciar las reacciones nucleares en los átomos del alimento que pudieran hacerlos radiactivos.

## Capítulo 34

### Preguntas conceptuales

**1.** Muy poco uranio en las minas es el isótopo fisionable U-235. **3.** Masa crítica es la cantidad más allá de la cual ocurre una fisión espontánea. **5.** Los dos métodos fueron difusión de gas y separación centrífuga. **7.** Combustible nuclear, barras de control, un moderador y un fluido para extraer calor son los componentes principales. **9.** El isótopo es U-239. **11.** El isótopo es Pu-239. **13.** Se produce plutonio. **15.** U-238 se reproduce para convertirse en Pu-239. **17.** Ventajas: electricidad abundante, combustibles fósiles ahorrados para materiales y ninguna contaminación atmosférica. Desventajas: almacenamiento de desechos, peligro de proliferación de armas, liberación de radiactividad y riesgo de accidentes. **19.** Sí y sí. La forma de energía es masa aumentada. **21.** La Figura 34.35 muestra la masa frente al número atómico, mientras que la Figura 34.16 muestra la masa *por nucleón* frente al número atómico. **23.** La masa por nucleón disminuye en los fragmentos de fisión. **25.** Avanzar hacia el hierro significa menos masa por nucleón. **27.** El helio debe fusionarse para liberar energía. **29.** El deuterio es abundante, se encuentra en el agua ordinaria. El tritio es escaso y debe crearse.

### Piensa y realiza

**31.** Respuesta abierta.

### Piensa y resuelve

**33.** Cuando el Li-6 absorbe un neutrón, se convierte en Li-7, hecho de tres protones y cuatro neutrones. Si este núcleo de Li-7 se divide en dos partes, una de las cuales es un núcleo de tritio que contiene un protón y dos neutrones, entonces la otra parte debe estar hecha de dos protones y dos neutrones. Esto es una partícula alfa, el núcleo del helio ordinario. Es el tritio, no el helio, el que alimenta la reacción explosiva.

### Piensa y clasifica

**35**. A, B, C, D

### Piensa y explica

**37.** Las plantas eléctricas nucleares usan fisión. **39.** La repulsión eléctrica entre protones se extiende a todo el núcleo y afecta a todos los protones, mientras que la fuerza nuclear de atracción se extiende sólo de un nucleón a los vecinos más cercanos. De modo que cuanto más grande sea el número de protones en un núcleo, mayor es la probabilidad de que la repulsión mutua supere las fuerzas nucleares de atracción y conduzcan a la fisión. **41.** En un gran pedazo de material fisionable, un neutrón puede moverse más lejos por el material antes de llegar a una superficie. Los volúmenes más grandes de material fisionable tienen un área proporcionalmente más pequeña comparada con sus volúmenes más grandes, y por tanto pierden menos neutrones. **43.** La masa crítica es la cantidad de masa fisionable que apenas sostiene una reacción en cadena sin explotar. Esto ocurre cuando la producción de neutrones en el material se equilibra con los neutrones que escapan por la superficie. Cuanto mayor sea el escape de neutrones, mayor es la masa crítica. Se sabe que una forma esférica tiene la menor área superficial para cualquier volumen dado, de modo que, para un volumen dado, un cubo tiene un área más grande y, por tanto, más "fuga" del flujo de neutrones. De modo que un cubo de masa crítica es más masivo que una esfera de masa crítica. (Imagínalo de la siguiente manera: una esfera de material fisionable que es crítica será subcrítica si se aplana en una forma de tortita, o se moldea en alguna otra forma, debido a la mayor fuga de neutrones.) **45.** Puesto que el plutonio libera más neutrones por evento de fisión, el plutonio puede soportar más fuga de neutrones y todavía ser crítico. De modo que el plutonio tiene una menor masa crítica que el uranio con una forma similar. **47.** El plutonio se acumula con el tiempo porque se produce por absorción de neutrones en el de otra forma inerte U-238. **49.** Un propósito de un ciclo separado de agua es restringir la contaminación radiactiva del agua del reactor con el reactor en sí y evitar la interacción de los contaminantes con el ambiente exterior. Además, el ciclo de agua primario puede operar a mayor presión y, en consecuencia, a temperatura más alta (muy por arriba del punto de ebullición normal del agua). **51.** La masa de un núcleo atómico es menor que la suma de las masas de los nucleones separados que lo componen. Considera el trabajo que debe realizarse para separar un núcleo en sus nucleones componentes, el cual, de acuerdo con $E = mc^2$, agrega masa al sistema. En consecuencia, los nucleones separados son más masivos que el núcleo del cual provienen. Observa la gran masa por nucleón del hidrógeno en la gráfica de la Figura 34.16. El núcleo de hidrógeno, un solo protón, ya está "afuera" en el sentido de que no está ligado a otros nucleones. **53.** Fisión y fusión son similares en que ambos son reacciones nucleares que liberan energía, lo que implica la transformación de uno o más elementos en otros elementos. Sin embargo, también difieren en formas importantes. La fisión no necesita temperaturas altas; la fusión, sí. La fisión involucra núcleos pesados; la fusión involucra núcleos ligeros. Como los nombres lo indican, fisión es la separación de un núcleo, mientras que fusión es la unión de núcleos. El concepto de masa crítica se aplica a la fisión, mas no a la fusión. **55.** El cobre, número atómico 59, fusionado con cinc, número atómico 30, se convierte en el elemento de tierra rara praseodimio, número atómico 59. **57.** Se produciría aluminio. (Dos átomos de carbono se fusionan para producir manganeso, número atómico 12. La emisión beta lo cambiaría a aluminio,

número atómico 13.) **59.** Si se localizara suficiente combustible de fisión, experimentaría en forma espontánea una reacción en cadena cuando se desencadenara con un solo neutrón. El combustible de fusión, por otra parte, es como el combustible fósil, no una sustancia que tenga reacción en cadena. No tiene "masa crítica" y puede almacenarse en cantidades grandes o pequeñas sin experimentar ignición espontánea. **61.** Una gran ventaja potencial de la energía de fusión sobre la energía de fisión tiene que ver con el combustible para cada una: el combustible de fusión (hidrógeno pesado) es abundante en la Tierra, especialmente en los océanos del mundo, mientras que el combustible de fisión (uranio y plutonio) es un recurso mucho más limitado. (Este desequilibrio también se sostiene a lo largo de todo el Universo.) Una segunda ventaja de la fusión tiene que ver con los subproductos: mientras que la fisión produce cantidades considerables de desechos radiactivos, el principal subproducto de la fusión es helio no radiactivo (aunque los neutrones liberados en la fusión pueden causar radiactividad en material circundante). **63.** Se produce rutenio. (U, con número atómico 92, se divide en paladio, con número atómico 46, que emite una partícula alfa con número atómico 2. Esto resulta en un elemento con número atómico 44, rutenio.) **65.** No. El U-235 (con su vida media más corta) experimenta un decaimiento radiactivo seis veces más rápido que el U-238 (vida media 4.5 mil millones de años), de modo que el uranio natural en una Tierra más vieja contendría un porcentaje mucho menor de U-235, no suficiente como para una reacción crítica sin enriquecimiento. (Por el contrario, en una Tierra más joven, el uranio natural contendría un porcentaje mayor de U-235 y sostendría más fácilmente una reacción en cadena.)

### Piensa y discute

**67.** Para predecir la energía liberada por una reacción nuclear, simplemente encuentra la diferencia entre la masa del núcleo de partida y la masa de su configuración después de la reacción (ya sea fisión o fusión). Esta diferencia de masa (llamada "defecto de masa") puede encontrarse a partir de la curva de la Figura 34.16 o a partir de una tabla de masas nucleares. Multiplica esta diferencia de masa por la rapidez de la luz al cuadrado: $E = mc^2$. ¡Ésta es la energía liberada! **69.** Fusionar núcleos pesados (que es la forma en la que se elaboran los elementos transuránicos) cuesta energía. La masa total de los productos es mayor que la masa total de los núcleos fusionados. **71.** Se liberaría energía por la fisión del oro y la fusión del carbono, pero ni por fisión ni por fusión del hierro. Ni fisión ni fusión resultan en una disminución de masa del hierro. **73.** Si la masa por nucleón variara de acuerdo con la forma de la curva de la Figura 34.15, y no de la curva de la Figura 34.16, entonces la fisión de todos los elementos liberaría energía y todos los procesos de fusión absorberían en lugar de liberar energía. Esto es así porque todas las reacciones de fisión (reducción de número atómico) resultarían en núcleos con menos masa por nucleón, y todas las reacciones de fusión (aumento de número atómico) resultarían en lo opuesto: núcleos con mayor masa por nucleón. **75.** El uranio inicial tiene más masa que los productos de fisión. **77.** La energía proveniente del Sol es la principal fuente de energía, que en sí misma es la energía de fusión. Aprovechar dicha energía en la Tierra ha resultado ser un reto descomunal. **79.** Tal especulación podría llenar volúmenes. La abundancia de energía y materiales que es el posible resultado de una era de fusión probablemente produciría varios cambios fundamentales. Los cambios obvios ocurrirían en los campos del comercio. Además, el calentamiento global generado por el ser humano se reduciría enormemente. Se evitarían las guerras regionales por la escasez de petróleo. Probablemente más recursos llegarían a las regiones subdesarrolladas del mundo. Una era de fusión probablemente vería cambios que tocarían cada faceta de la vida humana. **81.** En mil millones de años, habrá poco suministro de U-235 y la potencia de fisión probablemente será cosa del pasado.

## Capítulo 35

### Preguntas conceptuales

**1.** Tu rapidez en relación con el suelo es 61 km/h. **3.** FitzGerald planteó la hipótesis de que el aparato experimental se encogía. **5.** Las leyes de la naturaleza son las mismas en los marcos de referencia con movimiento uniforme. **7.** Las distancias son iguales vistas en el marco de referencia de la nave espacial. **9.** Hay tres dimensiones para espacio y una cuarta dimensión para tiempo. **11.** La razón es una constante, la rapidez de la luz. **13.** El "estiramiento" del tiempo se llama *dilatación del tiempo*. **15.** Las mediciones del tiempo difieren por 1.15 a la mitad de la rapidez de la luz. A 99.5%, las mediciones del tiempo difieren por un factor de 10. **17.** Al aproximarse a ti, los destellos aparecen con más frecuencia. **19.** Para la fuente que se aleja, los destellos se ven con el doble de separación. **21.** El valor máximo ocurre cuando las rapideces $v = c$; entonces $c_1c_2/c = 1$. El valor más pequeño es cero cuando o $v_1$ o $v_2$ son cero. **23.** Un obstáculo es la energía que se necesita; otro es el blindaje que encuentra la radiación. **25.** Lanzado a 99.5% de la rapidez de la luz, el metro parecería ser un décimo de su longitud original. **27.** En tu propio marco de referencia, no ocurriría contracción de la longitud local. **29.** Las partículas con gran rapidez muestran una trayectoria menos doblada debido a relatividad. **31.** La fisión de un solo núcleo de uranio produce 10 millones de veces más energía que la combustión de un solo átomo de carbono. **33.** $E = mc^2$ indica que la masa es energía condensada. **35.** Sí. Las ecuaciones de la relatividad se sostienen para rapideces cotidianas, pero difieren mucho de las ecuaciones clásicas para rapideces cercanas a la rapidez de la luz.

### Piensa y resuelve

**37.** La frecuencia y el periodo son recíprocos mutuos (consulta el Capítulo 19). Si la frecuencia se duplica, el periodo se reduce a la mitad. Para un movimiento uniforme, uno percibe sólo la mitad de tiempo entre destellos que se duplican en frecuencia. Para un movimiento acelerado, la situación es diferente. Si la fuente gana rapidez al aproximarse, entonces cada destello sucesivo tiene incluso menos distancia para viajar y la frecuencia aumenta más; el periodo disminuye más, así como el tiempo.

39. $$V = \frac{c + c}{1 + \frac{c^2}{c^2}} = \frac{2c}{1 + 1} = c$$

**41.** Para $v = 0.99c$, $\gamma$ es 7.1. La cantidad de movimiento del autobús es más que siete veces mayor de lo que se calcularía si la mecánica clásica fuera válida. Lo mismo es cierto de los electrones, o cualquier cosa que viaje con esta rapidez. **43.** El valor de $\gamma$ a $v = 0.10c$ es $1/\sqrt{1-(v^2/c^2)} = 1/\sqrt{1-(0.10)^2} = 1/\sqrt{1-0.01} = 1/\sqrt{0.99} = 1.005$. Tú medirías que la siesta del pasajero dura 1.005(5 m) = 5.03 min. **45.** El valor de $\gamma$ a $v = 0.5c$ es $1/\sqrt{1+(v^2/c^2)} = 1/\sqrt{1-(0.5)^2} = 1/\sqrt{1-0.25} = 1/\sqrt{0.75} = 1.15$. Al multiplicar 1 h de tiempo de taxi por $\gamma$ se obtiene 1.15 h de tiempo Tierra. La nueva paga del conductor será (10 h)(1.15) = 11.5 estelares por este viaje.

### Piensa y clasifica

47. C, B, A

### Piensa y explica

**49.** Sólo puede percibirse el movimiento acelerado, no el movimiento uniforme. Podrías no detectar tu movimento cuando viajes de manera uniforme, pero el movimiento acelerado podría detectarse con facilidad si observas que la superficie del agua en un tazón no está horizontal. **51.** En el caso de un haz de luz que brilla desde lo alto de un vagón en movimiento, el haz de luz tiene la misma rapidez en relación con el suelo que la que tiene en relación con el tren. La rapidez de la luz es la misma en todos los marcos de referencia. **53.** La rapidez *promedio* de la luz en un medio transparente es menor que $c$, pero en el modelo de luz analizado en el Capítulo 26, los fotones que constituyen el haz viajan a $c$ en el vacío que se encuentra entre los átomos del material. Por tanto, la rapidez de fotones individuales siempre es $c$. En cualquier caso, el postulado de Einstein es que la rapidez de la luz en el espacio *libre* es invariante. **55.** No se transporta ninguna energía o información perpendicular al haz barrido. **57.** Todo es cuestión de velocidad relativa. Si dos marcos de referencia están en movimiento relativo, entonces los eventos pueden ocurrir en el orden AB en un marco y en el orden BA en el otro marco. **59.** Sí. Si la distancia que la nave avanza hacia adelante en el tiempo que tarda la luz en llegar al extremo posterior es mayor que la distancia que se desplazó la bombilla, el observador exterior todavía verá la luz que llega primero a la parte posterior. **61.** Cuando se dice que la luz recorre cierta distancia en 20,000 años, se habla de la distancia en el marco de referencia propio. Desde el marco de referencia de un astronauta viajero, esta distancia bien podría ser más corta, acaso incluso tan corta que el astronauta podría cubrirla en 20 años de su tiempo (viajando, para estar seguro, con una rapidez cercana a la rapidez de la luz). En un futuro distante, los astronautas podrían viajar a destinos a muchos años luz de distancia en cuestión de meses en su marco de referencia. **63.** Una gemela que realiza un largo viaje con rapidez relativista regresa más joven que su hermana gemela quien se quedó en casa, pero ambas son más viejas que cuando se separaron. Si pudieran verse durante el viaje, no habría ningún momento donde alguna viera una inversión del envejecimiento, sólo un retraso o aceleración del envejecimiento. Una inversión hipotética resultaría sólo para rapideces mayores que la rapidez de la luz. **65.** Si estuvieras en una nave con gran rapidez (o sin rapidez), no observarías cambios en tu pulso o en tu volumen. Esto es así porque la velocidad entre el observador (esto es, tú mismo) y lo observado es cero. No ocurre un efecto relativista para el observador y lo observado cuando ambos están en el mismo marco de referencia. **67.** También te ven más pequeño. **69.** Sí, aunque sólo las grandes rapideces son significativas. Los cambios a rapideces bajas, aunque están ahí, son imperceptibles. **71.** Se mide que la densidad de un cuerpo en movimiento aumenta debido a una reducción en volumen para la misma masa. **73.** Para la ecuación de la rapidez de la luz, $v$ es $c$. Antes de desarrollarse la relatividad, $c$ podía tener un valor en un marco de referencia y un valor diferente en otro marco. Dependía del movimiento del observador. De acuerdo con la relatividad, $c$ es una constante, la misma para todos los observadores. **75.** El metro debe orientarse en una dirección perpendicular a su movimiento, a diferencia de una lanza arrojada de manera adecuada. Esto se debe

a que el metro viaja con una rapidez relativista (en realidad, 0.87*c*) como lo demuestra su aumento en cantidad de movimiento. El hecho de que su longitud no se altere significa que su dirección larga no está en la dirección de movimiento. El grosor del metro, no la longitud del metro, aparecerá encogido a la mitad. **77.** La cantidad de movimiento de la nave es el doble del valor clásico si su longitud medida es la mitad de su longitud normal. **79.** Para los electrones en movimiento, la contracción de la longitud reduce la longitud aparente del tubo de 2 millas de largo. Puesto que su rapidez es casi la rapidez de la luz, la contracción es grande. **81.** Para hacer que los electrones golpeen la pantalla con cierta rapidez, deben tener más cantidad de movimiento y más energía que si fuesen partículas no relativistas. La energía adicional la proporciona la compañía eléctrica. ¡La factura eléctrica es más grande! **83.** $E = mc^2$ significa que energía y masa son dos lados de la misma moneda, masa-energía. $c^2$ es la constante de proporcionalidad que vincula las unidades de energía y masa. En un sentido práctico, energía y masa son una y la misma. Cuando algo gana energía, gana masa. Cuando algo pierde energía, pierde masa. La masa es simplemente energía condensada. **85.** Sí, porque contiene más energía potencial, que tiene masa. **87.** Respuesta abierta.

### Piensa y discute

**89.** Michelson y Morley consideraron su experimento un fracaso porque no confirmó el resultado que esperaban, a saber, que encontrarían y medirían diferencias en la velocidad de la luz. No se encontraron tales diferencias. El experimento fue exitoso en cuanto a que abrió las puertas a nuevos conocimientos de la física. **91.** No. Rapidez y frecuencia son completamente diferentes una de otra. La frecuencia, cuán frecuente, no es lo mismo que la rapidez, cuán rápido. **93.** Datos experimentales en aceleradores han demostrado una y otra vez que, conforme se pone más y más energía en una partícula, la partícula nunca alcanza la rapidez de la luz. Su cantidad de movimiento crece sin límite, pero su rapidez no. Conforme se aproxima a la rapidez de la luz, la cantidad de movimiento de la partícula tiende al infinito. Hay una resistencia infinita para cualquier aumento adicional en cantidad de movimiento y, por tanto, en rapidez. De modo que *c* es el límite de rapidez para partículas materiales. (Del mismo modo, la energía cinética se aproxima al infinito conforme se aproxima a la rapidez de la luz.) **95.** No. La masa del material radiactivo disminuye, pero la masa del contenedor de plomo aumenta, de modo que no resulta un cambio de masa neto. Ha habido una redistribución de energía dentro del sistema trozo-contenedor, pero no un cambio en la energía total y, por tanto, no hay un cambio en masa. **97.** En este momento hay dos enormes obstáculos para la práctica del "salto centenario". Primero, aunque se tienen los medios para acelerar fácilmente partículas atómicas a rapideces que se aproximan a la rapidez de la luz, todavía no se tienen medios para impulsar un cuerpo tan masivo como una nave espacial habitada a rapideces relativistas. Segundo, si los hubiera, en la actualidad no hay forma de blindar a los ocupantes de tal nave de la radiación que resultaría de las colisiones a gran rapidez con materia interestelar. **99.** En lugar de decir que la materia no puede ni crearse ni destruirse, es más exacto decir que masa-energía no pueden crearse ni destruirse.

## Capítulo 36

### Preguntas conceptuales

**1.** La principal diferencia es la aceleración en la teoría de la relatividad general. **3.** Las observaciones hechas en un marco de referencia acelerado son indistinguibles de las observaciones hechas en un campo gravitacional newtoniano. **5.** Sólo durante un eclipse pueden verse las estrellas que de algún modo están detrás del Sol. **7.** El reloj más lento es el que está en la orilla del lago Michigan. **9.** Se ve que el tiempo frena. **11.** La ley de gravedad de Newton es válida para un campo gravitacional relativamente débil. **13.** Cuando el disco gira, la circunferencia experimenta una contracción de la longitud, pero el diámetro no. **15.** Un cambio en movimiento produce ondas gravitacionales. **17.** Las ondas gravitacionales son difíciles de detectar debido a su debilidad. **19.** La física newtoniana de hecho fue primordial para llevar al ser humano a la Luna.

### Piensa y explica

**21.** Los marcos de referencia que se aplican a la relatividad especial son de movimiento uniforme: velocidad constante. Los marcos de referencia que se aplican a la relatividad general incluyen marcos acelerados. **23.** Un astronauta, cuando está en órbita, aunque en manos de la gravedad de la Tierra, está ingrávido porque no hay fuerza de sostén (como se explicó en el Capítulo 9). Tanto el astronauta como la nave espacial están juntos en caída libre. **25.** La distancia de separación de dos personas que caminan hacia el norte desde el ecuador de la Tierra disminuye, y si continúan hacia el Polo Norte, su distancia de separación será cero. En el Polo Norte, ¡un paso en cualquier dirección es un paso al sur! **27.** En el entorno cotidiano no se percibe el doblamiento de la luz por la gravedad porque la gravedad que se experimenta es muy débil para crear un efecto notable. Para distancias que usan los topógrafos, un haz de luz es la mejor aproximación conocida de una línea recta. **29.** De acuerdo. La luz de las estrellas se dobla ya sea que la Luna obstruya o no su visión. Durante un eclipse, puedes ver mejor el efecto de doblamiento si comparas los desplazamientos de las estrellas en el otro lado del Sol. **31.** La distorsión del Sol al atardecer se debe a la refracción atmosférica, lo que no ocurre en la Luna debido a que carece de atmósfera. La desviación gravitacional de la luz es muy ligera para ver que roza la Luna o la Tierra. **33.** El cambio de energía en la luz se demuestra con un cambio en la frecuencia. Si la energía de la luz se reduce, como al viajar contra un intenso campo gravitacional, su frecuencia se reduce, y se dice que la luz está gravitacionalmente corrida al rojo. Si la energía de la luz aumenta, como cuando cae en un campo gravitacional, la Luna, monitorizada desde Tierra, corre un poco más rápido y está ligeramente corrida al azul. Aun cuando las señales que escapan de la Luna están corridas al rojo al ascender el campo gravitacional de la Luna, están corridas al azul aún más al descender a través del campo *g* más intenso de la Tierra, lo que resulta en un corrimiento al azul neto. **37.** Un reloj correría un poco más lento. Para los observadores en la Tierra, esto se debe a que un reloj que se mueve desde un polo hacia el ecuador se mueve en la dirección de la fuerza centrífuga, lo cual frena la tasa a la que corre el reloj (lo mismo que si se moviera en la dirección de una fuerza gravitacional). Para los observadores afuera en un marco inercial, el enlentecimiento del reloj en el ecuador es un ejemplo de dilatación del tiempo, un efecto de la relatividad especial causado por el movimiento del reloj. (La situación es muy parecida a la que se muestra en la Figura 36.9.) **39.** Al subir en un edificio se va en una dirección opuesta a la dirección de la fuerza gravitacional, y esto acelera el tiempo. La persona preocupada por vivir un poco más deberá vivir a nivel del suelo. Estrictamente hablando, las personas que viven en los *penthouse* viven vidas más rápidas. **41.** Los fotones de luz ascienden contra el campo gravitacional y pierden energía. Menos energía significa menor frecuencia. Tu amiga ve la luz corrida al rojo. La frecuencia que recibe es menor que la frecuencia que tú envías. **43.** El astronauta que cae hacia el agujero negro vería el resto del Universo corrido al azul. La escala de tiempo del astronauta se enlentece, lo cual hace que las escalas de tiempo en cualquiera otra parte parezcan rápidas para el astronauta. El corrimiento al azul también puede entenderse como el resultado de la gravedad del agujero negro que añade energía a los fotones que "caen" hacia el agujero negro. La energía añadida significa mayor frecuencia. **45.** Sí. Si la estrella es suficientemente masiva y está suficientemente concentrada, su gravedad debe ser tan fuerte como para hacer que la luz siga una trayectoria circular. Esto es lo que la luz hace en el "horizonte de eventos" de un agujero negro. **47.** Sí, así como un paso en cualquier dirección desde el Polo Norte es un paso hacia el sur. **49.** Sí, las estrellas binarias que se mueven en torno a un centro de masa común radian ondas gravitacionales, como lo hacen las masas en aceleración. **51.** La masa oscilatoria (o, de manera más general, la masa acelerada) es el mecanismo para la emisión de ondas gravitacionales, como la carga en oscilación o acelerada es el mecanismo para la emisión de ondas electromagnéticas. Cuando se absorbe, una onda gravitacional puede poner a oscilar una masa, como una onda electromagnética absorbida puede poner a oscilar una carga. (Los científicos que buscan detectar ondas gravitacionales intentan detectar pequeñas oscilaciones de materia causadas por la absorción de las ondas; consulta la Figura 36.16.) **53.** El Universo plano se expande por siempre. **55.** Respuesta abierta.

### Piensa y discute

**57.** No. El viejo Julio falló en esta ocasión. Al viajar a la deriva en una nave por el espacio, ya sea bajo la influencia de la Luna, la Tierra o cualquier otro campo gravitacional, tanto la nave como sus ocupantes están en un estado de caída libre, y en consecuencia no hay sensación de arriba o abajo. Los ocupantes de una nave espacial sentirían peso, o percibirían arriba o abajo, sólo si la nave acelerara, por decir, contra sus pies. Entonces podrían ponerse de pie y percibir que abajo es hacia sus pies y arriba es lejos de sus pies. **59.** Prudencia es más vieja. El tiempo de Caridad corre más lento durante la época que ella está en el borde del reino giratorio (consulta la Figura 36.9).

## Apéndice E (Crecimiento exponencial y tiempo de duplicación)

**1.** El estanque está cubierto a la mitad el día 29 y cubierto a un cuarto el día 28. La cobertura se duplica cada día. **3.** A una tasa de inflación estable de 3.5%, el tiempo de duplicación es 70/3.5% = 20 años; de modo que cada 20 años los precios de estos artículos se duplicarán. Esto significa que el boleto de teatro de $50 en 20 años costará $100, en 40 años costará $200, y en 60 años costará $400. El abrigo de $500 igualmente saltará cada 20 años a $1,000, $2,000 y $4,000. Para un automóvil de $50,000, los saltos en precio cada 20 años producen $100,000, $200,000 y $400,000. Para una casa de $500,000, ¡los saltos en precio cada 20 años son $1,000,000, $2,000,000 y $4,000,000! **5.** Si todas las cosas se conservan iguales, la duplicación de la producción de alimento para el doble del número de personas simplemente significa que el doble de personas comerá y el doble morirá de hambre y como mueren ahora. **7.** En el día 30, tu salario será $5,368,709.12, que es un centavo más que el total de $5,368,709.11 de todos los días anteriores.

# Glosario

**A** (a) Abreviatura de *ampere*. (b) Cuando es *a* minúscula cursiva, símbolo de *aceleración*.

**Aberración.** Distorsión de una imagen producida por una lente o espejo, causada por limitaciones inherentes en cierto grado en todos los sistemas ópticos. Véanse *aberración esférica* y *aberración cromática*.

**Aberración cromática.** Distorsión de una imagen causada cuando luz de diferentes colores (y, por tanto, con diferentes rapideces y refracciones) se enfoca en distintos puntos cuando pasa a través de un lente. Los lentes acromáticos corrigen este defecto al combinar lentes simples fabricados con diferentes tipos de vidrio.

**Aberración esférica.** Distorsión de una imagen causada cuando la luz que pasa a través de los bordes de una lente se enfocan en puntos ligeramente diferentes del punto donde se enfoca la luz que atraviesa el centro del lente. También ocurre con espejos esféricos.

**AC.** Abreviatura de *corriente alterna*.

**Aceleración (*a*).** Tasa a la que la velocidad de un objeto cambia con el tiempo; el cambio en la velocidad puede ser de magnitud (rapidez), dirección o ambos.

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

**Aceleración debida a la gravedad (*g*).** Aceleración de un objeto en caída libre. Su valor cerca de la superficie de la Tierra es de aproximadamente 9.8 $m/s^2$ (9.8 m/s cada segundo).

**Acústica.** Estudio de las propiedades del sonido, en especial su transmisión.

**Adhesión.** Atracción molecular entre dos superficies que están en contacto.

**Adiabático.** Término aplicado a la expansión o compresión de un gas que ocurre sin ganancia o pérdida de calor.

**Agua pesada.** Agua ($H_2O$) que contiene el isótopo de hidrógeno pesado deuterio; puede escribirse $D_2O$.

**Agujero de gusano.** Enorme distorsión hipotética del espacio y del tiempo, similar a un agujero negro, pero que se abre de nuevo en alguna otra parte del espacio-tiempo.

**Agujero negro.** Concentración de masa que resulta del colapso gravitacional, en cuya cercanía la gravedad es tan intensa que ni siquiera la luz puede escapar.

**Aislante.** (a) Material que es un mal conductor del calor y que demora la transferencia de calor. (b) Material que es mal conductor de la electricidad.

**Aleación.** Mezcla sólida compuesta de dos o más metales o de un metal y un no metal.

**Alquimista.** Practicante de la primera forma de química llamada alquimia, que se asociaba a la magia. La meta de la alquimia era convertir los metales básicos en oro y descubrir una poción que produjera juventud eterna.

**Altura.** La impresión subjetiva acerca de lo "alto" o "bajo" de un tono, que se relaciona con la frecuencia del tono. Una fuente que vibra a alta frecuencia produce un sonido de gran altura; una fuente que vibra a baja frecuencia produce un sonido de poca altura.

**AM.** Abreviatura de *amplitud modulada*.

**Ampere (A).** Unidad del SI de corriente eléctrica. Un ampere es un flujo de un coulomb de carga por segundo: $6.25 \times 10^{18}$ electrones (o protones) por segundo.

**Amperímetro.** Dispositivo que mide corriente. Véase *galvanómetro*.

**Amplitud.** Para una onda o vibración, desplazamiento máximo hacia cualquier lado de la posición de equilibrio (punto medio).

**Amplitud modulada (AM).** Tipo de modulación en el que la amplitud de la onda portadora de radiofrecuencia varía por arriba y abajo de su valor normal en una cantidad proporcional a la amplitud de la señal impresa.

**Análisis de Fourier.** Método matemático que descompone cualquier forma ondulatoria periódica en una combinación de ondas sinusoidales simples.

**Ángulo crítico.** Ángulo de incidencia mínimo para el cual un rayo de luz se refleja totalmente dentro de un medio.

**Ángulo de incidencia.** Ángulo entre un rayo incidente y la normal respecto de la superficie que encuentra.

**Ángulo de reflexión.** Ángulo entre un rayo reflejado y la normal respecto de la superficie de reflexión.

**Ángulo de refracción.** Ángulo entre un rayo refractado y la normal respecto de la superficie donde se refracta.

**Antimateria.** Materia compuesta de átomos con núcleos negativos y electrones positivos.

**Antinodo.** Cualquier parte de una onda estacionaria con máximo desplazamiento y máxima energía.

**Antipartícula.** Partícula que tiene la misma masa que una partícula normal, pero una carga del signo opuesto. La antipartícula del electrón es el positrón.

**Antiprotón.** Antipartícula del protón; un protón con carga negativa.

**Año luz.** Es la distancia que recorre la luz en el vacío en un año: $9.46 \times 10^{12}$ km.

**Apogeo.** Punto en una órbita elíptica más alejado del foco en torno al cual la órbita tiene lugar. Véase también *perigeo*.

**Armadura.** Parte de un motor o generador eléctrico donde se produce una fuerza electromotriz; por lo general, la parte giratoria.

**Armónico.** Véase *tono parcial*.

**Astigmatismo.** Defecto del ojo que se produce cuando la córnea se curva más en una dirección que en otra.

**Aterrizar.** Dejar que las cargas se muevan libremente a lo largo de una conexión desde un conductor hasta tierra; con frecuencia se realiza por seguridad.

**Átomo.** Partícula más pequeña de un elemento que tiene todas las propiedades químicas del elemento; consiste en protones y neutrones en un núcleo rodeado por electrones.

**Audio digital.** Sistema de reproducción de audio que usa código binario para grabar y reproducir sonido.

**Aurora boreal.** Brillo de la atmósfera causado por los iones que se encuentran arriba de la atmósfera y se zambullen en ésta; también se les llama luces del norte. En el hemisferio sur se llama aurora austral.

**Autoinducción.** Inducción de un campo eléctrico dentro de una sola bobina, causada por la interacción de las espiras dentro de la misma bobina. Este voltaje autoinducido siempre está en una dirección opuesta al voltaje variable que lo produce y comúnmente se denomina fuerza contraelectromotriz o contra-fem.

**Barómetro.** Dispositivo usado para medir la presión de la atmósfera.

**Barómetro aneroide.** Instrumento utilizado para medir la presión atmosférica; se basa en el movimiento de la tapa de una caja metálica, y no en el movimiento de un líquido.

**Barrera de sonido.** La acumulación de ondas sonoras enfrente de un avión que se aproxima o que alcanza la rapidez del sonido; en los albores de la aviación jet se creía que afectaba el control de la aeronave al crear una barrera de sonido que un avión debía romper para ir más rápido que la rapidez del sonido. La barrera del sonido no existe.

**Bastones.** Véase *retina*.

**Batimientos.** Secuencia de reforzamientos y cancelaciones alternados de dos conjuntos de ondas superpuestas que difieren en frecuencia; se escucha como un sonido de palpitación.

**bel.** Unidad de intensidad del sonido, llamada así en honor de Alexander Graham Bell. El umbral de audición es 0 bel ($10^{-12}$ W/m$^2$). Suele medirse en decibeles (dB, un décimo de bel).

***Big Bang.*** Explosión primordial que se cree que resultó en la creación del Universo en expansión.

**Bioluminiscencia.** Luz emitida por ciertos seres vivos que tienen la capacidad de excitar químicamente moléculas en sus cuerpos; después, dichas moléculas excitadas producen luz visible.

**Biomagnetismo.** Material magnético ubicado en los organismos vivos que puede ayudarlos a navegar, localizar alimento y realizar otros comportamientos.

**Bomba térmica.** Tipo de máquina térmica que saca calor de un ambiente frío y lo lleva a un ambiente caliente.

**Brazo de palanca.** Distancia perpendicular entre un eje y la línea de acción de una fuerza que tiende a producir rotación en torno a dicho eje.

**BTU.** Abreviatura de *unidad térmica británica* (del inglés, *british thermal unit*).

**C.** Abreviatura de *coulomb*.

**Caída libre.** Movimiento que está sólo bajo la influencia de la gravedad.

**Calentamiento global.** Véase *efecto invernadero*.

**Calidad.** Sonido característico de un instrumento musical o voz, que está gobernado por el número y las intensidades relativas de los tonos parciales. Se relaciona con el patrón de la onda sonora. También llamado timbre, tono y calidad tonal.

**Calor.** Energía que "fluye" de un objeto a otro en virtud de una diferencia de temperatura; se mide en *calorías* o *joules*.

**Calor de fusión.** Cantidad de energía que debe agregarse a un kilogramo de un sólido (ya en su punto de fusión) para fundirlo. Véase *calor latente de fusión*.

**Calor de vaporización.** Cantidad de energía que debe agregarse a un kilogramo de un líquido (ya en su punto de ebullición) para evaporarlo. Véase *calor latente de vaporización*.

**Calor latente de fusión.** Cantidad de energía necesaria para cambiar una unidad de masa de una sustancia de sólido a líquido (y viceversa si dicha cantidad de energía se retira). Véase *calor de fusión*.

**Calor latente de vaporización.** Cantidad de energía necesaria para cambiar una unidad de masa de una sustancia de líquido a gas (y viceversa). Véase *calor de vaporización*.

**Caloría (cal).** Unidad de calor. Una caloría es el calor necesario para aumentar en 1 grado Celsius la temperatura de 1 gramo de agua. Una Caloría (con *C* mayúscula) es igual a 1,000 calorías y es la unidad usada para describir la energía disponible de los alimentos; también se llama kilocaloría (kcal).

$$1 \text{ cal} = 4.19 \text{ J o } 1 \text{ J} = 0.24 \text{ cal}$$

**Cámara de niebla.** Dispositivo que sirve para detectar las trayectorias de las partículas emitidas por fuentes radiactivas.

**Campo de fuerza.** Aquello que existe en el espacio alrededor de una masa, carga eléctrica o imán, de modo que otra masa, carga eléctrica o imán introducido en esta región experimentará una fuerza. Ejemplos de campos de fuerza son los campos gravitacionales, eléctricos y magnéticos.

**Campo eléctrico.** Campo de fuerza que llena el espacio alrededor de toda carga eléctrica o grupo de cargas; se mide mediante la fuerza sobre la carga (newtons/coulomb).

**Campo gravitacional.** Campo de fuerza que existe en el espacio alrededor de toda masa o grupo de masas; se mide en newtons por kilogramo.

**Campo magnético.** Región de influencia magnética alrededor de un polo magnético o una partícula cargada en movimiento.

**Cantidad de movimiento.** Inercia en movimiento. El producto de la masa y la velocidad de un objeto (siempre que la rapidez sea mucho menor que la rapidez de la luz). La cantidad de movimiento tiene magnitud y dirección y, por tanto, es una cantidad vectorial. También llamada cantidad de movimiento lineal y se abrevia *p*.

$$p = mv$$

**Cantidad de movimiento angular.** Producto de la inercia rotacional de un cuerpo y su velocidad rotacional alrededor de un eje particular. Para un objeto que es pequeño comparado con la distancia radial, su magnitud es el producto de la masa, la rapidez y la distancia radial desde el eje de rotación.

$$\text{Cantidad de movimiento angular} = mvr$$

**Cantidad de movimiento lineal.** Producto de la masa y la velocidad de un objeto; también llamada cantidad de movimiento. (Esta definición se aplica a rapideces mucho menores que la rapidez de la luz.)

**Cantidad escalar.** Cantidad en física, como la masa, el volumen y el tiempo, que pueden especificarse completamente por su magnitud y no tiene dirección.

**Cantidad vectorial.** Cantidad en física que tiene tanto magnitud como dirección. Son ejemplos fuerza, velocidad, aceleración, momento de torsión, y los campos eléctricos y magnéticos.

**Capacidad calorífica específica.** Cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia

en 1 grado Celsius (o, de manera equivalente, en 1 kelvin); a menudo sólo se le llama calor específico.

**Capacitor.** Dispositivo utilizado para almacenar carga en un circuito.

**Capilaridad.** Elevación de un líquido por un delgado tubo hueco o en un espacio estrecho.

**Carga eléctrica.** Propiedad eléctrica fundamental a la que se atribuye la atracción o repulsión mutua entre electrones o protones.

**Carga por contacto.** Transferencia de carga eléctrica entre objetos al frotarlos o simplemente al tocarlos.

**Carga por inducción.** Redistribución de cargas eléctricas en y sobre los objetos causada por la influencia eléctrica de un objeto cargado que está cercano pero no en contacto.

**CD.** Abreviatura de *corriente directa*.

**Celda de combustible.** Dispositivo que convierte energía química en energía eléctrica pero, a diferencia de una batería, se alimenta de manera continua con combustible, por lo general hidrógeno.

**Centro de gravedad (CG).** Punto en el centro de la distribución de peso de un objeto, donde puede considerarse que actúa la fuerza de gravedad.

**Centro de masa.** Punto en el centro de la distribución de masa de un objeto, donde puede considerarse que se concentra toda su masa. Para condiciones cotidianas, es lo mismo que el centro de gravedad.

**Cero absoluto.** Temperatura más baja posible que puede tener cualquier sustancia; temperatura a la que los átomos de una sustancia tienen su energía cinética mínima. La temperatura del cero absoluto es $-273.15°C$, que es $-459.7°F$ y 0 K.

**CG.** Abreviatura de *centro de gravedad*.

**Chinook.** Viento seco y cálido que sopla desde el lado este de las Montañas Rocosas y atraviesa las grandes planicies estadounidenses.

**Ciclotrón.** Acelerador de partículas que imparte alta energía a partículas cargadas como protones, deuterones e iones helio.

**Cinturones de radiación Van Allen.** Dos cinturones de radiación, con forma de dona, que rodean la Tierra.

**Circuito.** Cualquier trayectoria completa a lo largo de la cual puede fluir carga eléctrica. Véanse también *circuito en serie* y *circuito en paralelo*.

**Circuito en paralelo.** Circuito eléctrico con dos o más dispositivos conectados de tal forma que el mismo voltaje actúa a través de cada uno y cualquiera completa el circuito independientemente de los otros. Véase también *en paralelo*.

**Circuito en serie.** Circuito eléctrico con dispositivos conectados de tal forma que la corriente eléctrica a través de cada uno de ellos es la misma. Véase también *en serie*.

**Código binario.** Código basado en el sistema de números binarios (que usa una base 2). En código binario, cualquier número puede expresarse como una sucesión de 1 y 0. Por ejemplo, el número 1 es 1, 2 es 10, 3 es 11, 4 es 100, 5 es 101, 17 es 10001, y así sucesivamente. Estos 1 y 0 pueden luego interpretarse y transmitirse electrónicamente como una serie de pulsos "encendido" y "apagado", la base de todas las computadoras y otros equipos digitales.

**Colisión elástica.** Colisión en la que los objetos que chocan rebotan sin deformación duradera ni generación de calor.

**Colisión inelástica.** Colisión en la que los objetos que chocan se distorsionan y/o generan calor durante la colisión, y posiblemente quedan unidos.

**Colores complementarios.** Cualesquiera dos colores de luz que, cuando se suman, producen luz blanca.

**Colores primarios.** Véanse *colores primarios aditivos* y *colores primarios sustractivos*.

**Colores primarios aditivos.** Tres colores de luz (rojo, azul y verde, por ejemplo) que, cuando se suman en ciertas proporciones, producirán cualquier color del espectro.

**Colores primarios sustractivos.** Los tres colores de pigmentos que absorben luz (magenta, amarillo y cian, por ejemplo) que, cuando se mezclan en ciertas proporciones, reflejan cualquier color en el espectro.

**Complementariedad.** Principio enunciado por Niels Bohr que afirma que los aspectos ondulatorio y corpuscular, tanto de la materia como de la radiación, son partes necesarias y complementarias del todo. Cuál parte se enfatiza depende de qué experimento se realice (es decir: de qué preguntas plantea uno a la naturaleza).

**Componente.** Uno de los vectores perpendiculares que suman en total un vector particular (por ejemplo, las componentes horizontal y vertical de la velocidad).

**Compresión.** (a) En mecánica, el acto de oprimir un material y reducir su volumen. (b) En sonido, la región de aumento de presión en una onda longitudinal.

**Compuesto.** Sustancia química hecha de átomos de dos o más elementos diferentes combinados en una proporción fija.

**Condensación.** Cambio de fase de un gas a un líquido; lo opuesto de la evaporación.

**Conducción.** (a) En calor, transferencia de energía de partícula a partícula en el interior de ciertos materiales, o de un material a otro cuando los dos están en contacto directo. (b) En electricidad, el flujo de carga eléctrica a través de un conductor.

**Conductor.** (a) Material a través del cual se puede transferir el calor. (b) Material, en general un metal, a través del cual puede fluir la carga eléctrica. Por lo general, los buenos conductores de calor son buenos conductores de carga eléctrica.

**Congelación.** Cambio de fase de líquido a sólido; lo opuesto de la fusión.

**Conos.** Véase *retina*.

**Conservación de cantidad de movimiento angular.** Cuando no actúa un momento de torsión externo sobre un objeto o un sistema de objetos, no ocurre ningún cambio en la cantidad de movimiento angular. Por tanto, la cantidad de movimiento angular antes de un evento que implique sólo momentos de torsión internos es igual a la cantidad de movimiento angular después del evento.

**Conservación de carga.** Principio de que la carga eléctrica neta no se crea ni se destruye, sino que se transfiere de un objeto a otro.

**Conservación de energía.** Principio de que la energía no puede crearse ni destruirse. Se puede transformar de una forma en otra, o transferirse de un objeto a otro, pero la cantidad total de energía nunca cambia.

**Conservación de energía para máquinas.** La salida de trabajo de cualquier máquina en estado estacionario no puede exceder el trabajo de entrada.

**Conservación de la cantidad de movimiento.** En ausencia de una fuerza externa neta, la cantidad de movimiento de un objeto o sistema de objetos no cambia.

$$mv_{\text{(antes del evento)}} = mv_{\text{(después del evento)}}$$

**Conservada.** Término que se aplica a una cantidad física, como la cantidad de movimiento, la energía o la carga eléctrica, que permanece invariable durante las interacciones.

**Constante de gravitación universal.** La constante de proporcionalidad $G$ que mide la intensidad de la gravedad en la ecuación de la ley de gravitación universal de Newton.

$$F \sim \frac{m_1 m_2}{d^2} \text{ o } F = G\frac{m_1 m_2}{d^2}$$

**Constante de Planck ($h$).** Constante fundamental de la teoría cuántica que determina la escala del mundo a pequeña escala.

$$h = 6.6 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$$

Cuando la constante de Planck se multiplica por la frecuencia de la luz, esto es igual a su energía.

$$E = hf$$

**Constante solar.** 1,400 J/m$^2$ recibidos del Sol cada segundo en la parte superior de la atmósfera de la Tierra; expresada en términos de potencia, 1.4 kW/m$^2$.

**Contacto térmico.** Estado de dos o más objetos o sustancias en contacto de forma tal que el calor puede fluir de uno al otro.

**Contador de centelleos.** Dispositivo usado para medir radiación de fuentes radiactivas.

**Contador Geiger.** Dispositivo usado para detectar radiación proveniente del decaimiento radiactivo y mide su tasa.

**Contaminación térmica.** Calor indeseable expulsado de una máquina térmica u otra fuente.

**Contracción de la longitud.** Encogimiento del espacio y, por tanto, de la materia, en un marco de referencia que se mueve con rapideces relativistas.

**Contracción de Lorentz.** Véase *contracción de la longitud*.

**Contraparte de Maxwell a la ley de Faraday.** Un campo magnético se crea en cualquier región del espacio donde un campo eléctrico cambie con el tiempo. La magnitud del campo magnético inducido es proporcional a la tasa a la que cambia el campo eléctrico. La dirección del campo magnético inducido es en ángulos rectos respecto del campo eléctrico variable.

**Convección.** Medio de transferencia de calor por el movimiento de la propia sustancia calentada, como por las corrientes en un fluido.

**Córnea.** Recubrimiento transparente del globo ocular que ayuda a enfocar la luz entrante.

**Corriente.** Véase *corriente eléctrica*.

**Corriente alterna (CA).** Corriente eléctrica que invierte rápido su dirección. Las cargas eléctricas vibran alrededor de posiciones relativamente fijas, por lo general a la tasa de 60 Hz en Estados Unidos.

**Corriente directa (CD).** Corriente eléctrica en la que el flujo de carga siempre es en una dirección.

**Corriente eléctrica.** Flujo de carga eléctrica que transporta energía de un lugar a otro; se mide en amperes, donde 1 ampere es el flujo de $6.25 \times 10^{18}$ electrones (o protones) por segundo.

**Corrimiento al azul.** Aumento de la frecuencia medida de la luz proveniente de una fuente que se acerca; se llama corrimiento al azul porque el aumento aparente es hacia el extremo de alta frecuencia, o azul, del espectro de color. También ocurre cuando un observador se aproxima a una fuente. Véase también *efecto Doppler*.

**Corrimiento al rojo.** Disminución de la frecuencia medida de la luz (u otra radiación) desde una fuente que se aleja; se llama *corrimiento al rojo* porque la disminución es hacia el extremo de baja frecuencia, o rojo, del espectro de color. Véase también *efecto Doppler*.

**Corrimiento gravitacional al rojo.** Corrimiento en longitud de onda hacia el extremo rojo del espectro experimentado por la luz que sale de la superficie de un objeto masivo, según predice la teoría de la relatividad general.

**Cortocircuito.** Interrupción en un circuito eléctrico causada por el flujo de carga a lo largo de una trayectoria de baja resistencia entre dos puntos que no deben estar directamente conectados, lo que por tanto desvía la corriente de su trayectoria adecuada; un efectivo "acortamiento del circuito".

**Cosmología.** Estudio del origen y creación de todo el Universo.

**Coulomb (C).** Unidad del SI de carga eléctrica. Un coulomb es igual a la carga total de $6.25 \times 10^{18}$ electrones.

**Crecimiento exponencial.** Aumento por el mismo factor (por ejemplo, por un factor de 2) en tiempos iguales.

**Cresta.** Uno de los lugares de una onda donde la onda es más alta o la perturbación es mayor en la dirección opuesta de un valle. Véase también *valle*.

**Cristal.** Forma geométrica regular que suele encontrarse en un sólido donde las partículas componentes están distribuidas en un patrón tridimensional repetitivo y ordenado.

**Cristal dicroico.** Cristal que divide la luz no polarizada en dos haces internos polarizados en ángulos rectos y absorbe poderosamente un haz al tiempo que transmite el otro.

**Cuanto.** De la palabra latina *quantus*, que significa "cuánto", un cuanto es la unidad elemental más pequeña de una cantidad, la cantidad discreta más pequeña de algo. Un cuanto de energía electromagnética se llama fotón. Véase también *mecánica cuántica* y *Teoría cuántica*.

**Curva de radiación de la luz solar.** Véase *curva de radiación solar*.

**Curva de radiación solar.** Gráfica de brillo frente a frecuencia (o longitud de onda) de la luz solar.

**Curva sinusoidal.** Curva cuya forma representa las crestas y valles de una onda, según traza un péndulo que suelta un rastro de arena mientras se balancea en ángulo recto hacia y sobre una banda transportadora en movimiento.

**Datación con carbono.** Proceso para determinar el tiempo que ha transcurrido desde la muerte por medio de la medición de la radiactividad del carbono de una muestra debida al carbono-14 que contiene.

**dB.** Abreviatura de decibel. Véase *bel*.

**Decaimiento exponencial.** Disminución por el mismo factor (por ejemplo, por un factor de 2) en tiempos iguales.

**decibel (dB).** Un décimo de *bel*.

**Declinación magnética.** Discrepancia entre la orientación de una brújula que apunta hacia el norte magnético y el verdadero norte geográfico.

**Densidad.** Masa de una sustancia por unidad de volumen. La densidad de peso es el peso por unidad de volumen. En general, cualquier cantidad por elemento de espacio (por ejemplo, número de puntos por área).

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

$$\text{Densidad de peso} = \frac{\text{peso}}{\text{volumen}}$$

**Desexcitación.** Véase *excitación*.

**Desplazado.** Término aplicado al fluido que se quita del camino cuando un objeto se coloca en un fluido. Un objeto sumergido siempre desplaza un volumen de fluido igual a su propio volumen. Un objeto que flota siempre desplaza un peso de fluido igual a su propio peso.

**Deuterio.** Isótopo del hidrógeno cuyo átomo tiene un protón, un neutrón y un electrón. El isótopo común del hidrógeno sólo tiene un protón y un electrón; por tanto, el deuterio tiene más masa.

**Deuterón.** Núcleo de un átomo de deuterio; tiene un protón y un neutrón.

**Diferencia de potencial.** Diferencia en el potencial eléctrico (energía potencial eléctrica por carga) entre dos puntos; también llamada diferencia de voltaje o simplemente voltaje. Las cargas libres fluyen cuando hay una diferencia y seguirán fluyendo hasta que ambos puntos alcancen un potencial común.

**Difracción.** Plegamiento de la luz que pasa alrededor de un obstáculo o por una rendija estrecha, lo que hace que la luz se disperse y produzca franjas claras y oscuras.

**Dilatación del tiempo.** Enlentecimiento del tiempo para un objeto en movimiento según lo juzgan quienes lo ven moverse.

**Diodo.** Dispositivo electrónico que restringe la corriente a una sola dirección en un circuito eléctrico; un dispositivo que cambia la corriente alterna a corriente directa.

**Diodo emisor de luz (LED).** Diodo que emite luz.

**Dipolo eléctrico.** Molécula en la que la distribución de carga es dispareja, lo que resulta en cargas un poco opuestas en lados opuestos de la molécula.

**Disco versátil digital (DVD).** Antes denominado disco de video digital, es un disco compacto que contiene material de video.

**Dispersar.** Absorber sonido o luz y reemitirlo en todas direcciones.

**Dispersión.** (a) Emisión en direcciones aleatorias de luz que encuentra partículas que son pequeñas comparadas con la longitud de onda de la luz; más a menudo en longitudes de onda cortas (azul) que en longitudes de onda largas (rojo). (b) Separación de luz en colores ordenados de acuerdo con su frecuencia; por ejemplo, por la interacción con un prisma o una rejilla de difracción.

**Disyuntor.** Dispositivo en un circuito eléctrico que rompe el circuito cuando la corriente se vuelve tan alta como para iniciar un incendio.

**Dominio magnético.** Grupo microscópico de átomos con sus campos magnéticos alineados.

**Ebullición.** Cambio de líquido a gas que ocurre bajo la superficie del líquido; vaporización rápida. El líquido pierde energía y el gas la gana.

**EC.** Abreviatura de *energía cinética*.

**Eclipse lunar.** Evento en el que la Luna llena pasa en la sombra de la Tierra.

**Eclipse solar.** Evento en el cual la Luna bloquea la luz proveniente del Sol y la sombra de la Luna cae sobre parte de la Tierra.

**Eco.** Reflexión de sonido.

**Ecuación de onda de Schrödinger.** Ecuación fundamental de la mecánica cuántica, que interpreta la naturaleza ondulatoria de las partículas materiales en términos de amplitudes de onda de probabilidad. Esta ecuación es tan básica a la mecánica cuántica como las leyes de movimiento de Newton lo son para la mecánica clásica.

**Efecto Doppler.** Cambio en frecuencia de una onda de sonido o de luz debido al movimiento de la fuente o del receptor. Véase también *corrimiento al rojo* y *corrimiento al azul*.

**Efecto fotoeléctrico.** Expulsión de electrones de ciertos metales cuando se exponen a ciertas frecuencias de luz.

**Efecto invernadero.** Calentamiento causado por la energía radiante de longitud de onda corta proveniente del Sol que entra con facilidad en la atmósfera y es absorbida por la Tierra, pero cuando se irradia a longitudes de onda más largas no puede escapar con facilidad de la atmósfera de la Tierra.

**Efecto mariposa.** Situación en la que un cambio muy pequeño en un lugar puede amplificarse y generar un gran cambio en alguna otra parte.

**Eficiencia.** En una máquina, la razón de la energía de salida útil con respecto a la energía total de entrada, o el porcentaje del trabajo de entrada que se convierte en trabajo de salida.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{salida de energía útil}}{\text{entrada de energía total}}$$

**Eficiencia de Carnot.** Porcentaje máximo ideal de energía de entrada que puede convertirse en trabajo en una máquina térmica.

**Eficiencia ideal.** Límite superior de eficiencia para todas las máquinas térmicas; depende de la diferencia de temperatura entre la admisión y el escape.

$$\text{Eficiencia ideal} = \frac{T_{\text{caliente}} - T_{\text{frío}}}{T_{\text{caliente}}}$$

**Eje.** (a) Línea recta en torno a la cual la rotación tiene lugar. (b) Líneas rectas para referencia en una gráfica; por lo general el eje $x$ mide el desplazamiento horizontal y el eje $y$ mide el desplazamiento vertical.

**Eje principal.** Línea que une los centros de curvatura de las superficies de una lente. Línea que une el centro de curvatura y el foco de un espejo.

**Elasticidad.** Propiedad de un sólido de experimentar un cambio en su forma cuando una fuerza deformante actúa sobre él y regresar a su forma original cuando se retira la fuerza deformante.

**Eléctricamente polarizado.** Término aplicado a un átomo o molécula en la que las cargas están alineadas de modo que un lado es un poco más positivo o negativo que el lado opuesto.

**Electricidad.** Término general para los fenómenos eléctricos, muy parecido a como la gravedad tiene que ver con los fenómenos gravitacionales, o la sociología con los fenómenos sociales.

**Electrodinámica.** Estudio de las cargas eléctricas en movimiento, en oposición a la electrostática.

**Electrodo.** Terminal (por ejemplo, de una batería) a través de la cual puede pasar corriente eléctrica.

**Electroimán.** Imán cuyas propiedades magnéticas se producen por una corriente eléctrica.

**Electromagnetismo.** Fenómeno asociado a los campos eléctrico y magnético y sus interacciones mutuas y con cargas y corrientes eléctricas.

**Electrón.** Partícula negativa en la capa de un átomo.

**Electrón-volt (eV).** Cantidad de energía igual a la energía que adquiere un electrón cuando acelera a través de una diferencia de potencial de 1 V.

**Electrones de conducción.** Electrones en un metal que se mueven libremente de átomo en átomo y portan carga eléctrica.

**Electrostática.** Estudio de las cargas eléctricas en reposo, en oposición a la electrodinámica.

**Elemento.** Sustancia compuesta de átomos que tienen el mismo número atómico y, por tanto, las mismas propiedades químicas.

**Elemento transuránico.** Elemento que está más arriba que el uranio en la tabla periódica.

**Elipse.** Curva cerrada a manera de círculo "estirado", en la que la suma de las distancias desde cualquier punto de la curva hasta dos puntos focales internos es una constante.

**En fase.** Término aplicado a dos o más ondas cuyas crestas (y valles) llegan a un lugar al mismo tiempo, de modo que sus efectos se refuerzan entre sí.

**En paralelo.** Término aplicado a las porciones de un circuito eléctrico que se conectan en dos puntos y ofrecen rutas alternativas para la corriente entre dichos dos puntos.

**En serie.** Término aplicado a las porciones de un circuito eléctrico que se conectan en fila, de modo que la corriente que pasa a través de una debe pasar a través de todas ellas.

**Energía.** Aquello que puede cambiar la condición de la materia. Si bien a menudo la energía se define como la capacidad para realizar trabajo, en realidad sólo se la puede describir con ejemplos.

**Energía cinética (EC).** Energía de movimiento; igual (no en términos relativistas) a la masa multiplicada por el cuadrado de la rapidez, multiplicada por la constante 1/2.

$$\text{EC} = \frac{1}{2}mv^2$$

**Energía en reposo.** La "energía de ser", dada por la ecuación $E = mc^2$.

**Energía interna.** La energía total almacenada en los átomos y moléculas dentro de una sustancia. Los cambios en la energía interna son de gran interés en la termodinámica.

**Energía mecánica.** Energía debida a la posición o al movimiento de algo; energía potencial o cinética (o una combinación de ambas).

**Energía oscura.** Nombre con el que se designa el hecho aparente de que el Universo se expande de manera acelerada.

**Energía potencial (EP).** Energía de posición; por lo general se relaciona con la posición relativa de dos cosas, como una piedra y la Tierra (EP gravitacional), o un electrón y un núcleo (EP eléctrica).

**Energía potencial eléctrica.** Energía que posee una carga en virtud de su posición en un campo eléctrico.

**Energía potencial gravitacional.** Energía asociada a un campo gravitacional, que sobre la Tierra resulta de la interacción gravitacional de un cuerpo y la Tierra. La energía potencial (EP) cerca de la superficie de la Tierra es igual a la masa ($m$) por la aceleración debida a la gravedad ($g$) por la altura ($h$) desde un nivel de referencia como la superficie de la Tierra.

$$\text{EP} = mgh$$

**Energía punto cero.** Cantidad extremadamente pequeña de energía cinética que las moléculas o átomos tienen incluso en cero absoluto.

**Energía radiante.** Cualquier energía, incluidos calor, luz y rayos X, que se transmite por radiación; ocurre en la forma de ondas electromagnéticas.

**Enlace atómico.** Unión de átomos para formar estructuras más grandes, como moléculas y sólidos.

**Entropía.** Medida del desorden de un sistema. Siempre que la energía se transforma libremente de una forma en otra, la dirección de la transformación es hacia un estado de mayor desorden y, por tanto, hacia uno de mayor entropía.

**EP.** Abreviatura de *energía potencial*.

**Equilibrio.** En general, un estado de balance. En cuanto al equilibrio mecánico, estado en el que no actúan ni fuerzas netas ni momentos de torsión netos. En líquidos, estado en el que la evaporación es igual a la condensación. De manera más general, estado en el que no ocurren cambios netos de energía.

**Equilibrio estable.** Estado de un objeto equilibrado de modo que cualquier pequeño desplazamiento o rotación eleva su centro de gravedad.

**Equilibrio inestable.** Estado de un objeto equilibrado de modo que cualquier pequeño desplazamiento o rotación baja su centro de gravedad.

**Equilibrio mecánico.** Estado de un objeto o sistema de objetos para los cuales cualquier fuerza aplicada se cancela y no ocurre aceleración ni hay un momento de torsión neto; esto es, $\Sigma F = 0$ y $\Sigma\tau = 0$.

**Equilibrio térmico.** Estado en el que las sustancias en contacto térmico alcanzan una temperatura común.

**Equivalencia masa-energía.** Relación entre la masa y la energía dada por la ecuación:

$$E = mc^2$$

donde $c$ es la rapidez de la luz.

**Escala.** En música, una sucesión de notas de frecuencias que están en razones simples una con otra.

**Escala Celsius.** Escala de temperatura que asigna 0 al punto de fusión-congelación del agua y 100 al punto de ebullición-condensación del agua a presión estándar (1 atmósfera a nivel del mar).

**Escala Fahrenheit.** Escala de temperatura de uso común en Estados Unidos. El número 32 se asigna al punto de fusión-congelación del agua, y el número 212 al punto de ebullición-condensación del agua a presión estándar (1 atmósfera, a nivel del mar).

**Escala Kelvin.** Escala de temperatura, medida en kelvins, K, cuyo cero (llamado cero absoluto) es la temperatura a la que es imposible extraer más energía interna de un material; $0\ \text{K} = -273.15°\text{C}$. En la escala Kelvin no hay temperaturas negativas.

**Escalamiento.** Estudio de cómo el tamaño afecta las relaciones entre peso, fortaleza y área superficial.

**Espacio-tiempo.** Continuo tetradimensional en el que tienen lugar todos los eventos y existen todas las cosas; tres dimensiones son las coordenadas de espacio y la cuarta es de tiempo.

**Espectro.** Para la luz solar y otra luz blanca, la dispersión de colores vistos cuando la luz pasa a través de un prisma o rejilla de difracción. Los colores del espectro, en orden de menor frecuencia (longitud de onda más larga) a mayor frecuencia (longitud de onda más corta), son: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo, violeta. Véanse también *espectro de absorción*, *espectro electromagnético*, *espectro de emisión* y *prisma*.

**Espectro de absorción.** Espectro continuo, como el generado por la luz blanca, interrumpido por líneas o bandas oscuras que resultan de la absorción de luz de ciertas frecuencias por una sustancia a través de la cual pasa la luz.

**Espectro de emisión.** Distribución de longitudes de onda en la luz proveniente de una fuente luminosa.

**Espectro de líneas.** Patrón de distintas líneas de color, correspondientes a frecuencias particulares de luz, que se ven en un espectroscopio cuando se observa un gas caliente. Cada elemento tiene un patrón de líneas único.

**Espectro electromagnético.** Rango de frecuencias sobre el cual puede propagarse la radiación electromagnética. Las frecuencias más bajas se asocian a las ondas de radio; las microondas tienen una frecuencia más alta, y luego están en secuencia las ondas infrarrojas, la luz, la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma.

**Espectro visible.** Véase *espectro electromagnético*.

**Espectrómetro.** Véase *espectroscopio*.

**Espectrómetro de masas.** Dispositivo que separa magnéticamente iones cargados de acuerdo con su masa.

**Espectroscopio.** Instrumento óptico que separa la luz en sus frecuencias o longitudes de onda constituyentes en la forma de líneas espectrales. Un *espectrómetro* es un instrumento que también puede medir las frecuencias o longitudes de onda.

**Espejismo.** Falsa imagen que aparece en la distancia y se debe a la refracción de la luz en la atmósfera de la Tierra.

**Espejo cóncavo.** Espejo que se curva hacia adentro como una "cueva". Véase también *espejo convexo*.

**Espejo convexo.** Espejo que se curva hacia afuera. La imagen virtual formada es más pequeña y está más cerca del espejo que el objeto. Véase también *espejo cóncavo*.

**Espejo plano.** Espejo con una superficie plana.

**Estado metaestable.** Estado de excitación de un átomo que se caracteriza por una prolongada demora antes de la desexcitación.

**Estampido sónico.** Fuerte sonido que resulta de la incidencia de una onda de choque.

**Estrella de neutrones.** Estrella que experimentó un colapso gravitacional en el cual los electrones se comprimieron hacia los protones para formar neutrones.

**Éter.** Medio hipotético invisible que antes se creía que era necesario para la propagación de las ondas electromagnéticas y se pensaba que llenaba el espacio de todo el Universo.

**eV.** Abreviatura para *electrón-volt*.

**Evaporación.** Cambio de fase de líquido a gas que tiene lugar en la superficie de un líquido; lo opuesto a la condensación.

**Excitación.** Proceso de impulsar uno o más electrones en un átomo o molécula de un nivel de energía más bajo a uno más alto. Un átomo en un estado excitado por lo general decaerá (se desexcitará) más rápido hacia un estado más bajo por la emisión de radiación. La frecuencia y energía de la radiación emitida se relacionan mediante

$$E = hf$$

**Fase.** (a) Una de las cuatro principales formas de materia: sólido, líquido, gas y plasma; generalmente se le denomina estado. (b) La parte de un ciclo que ha avanzado una onda (o la Luna) en cualquier momento. Véase también *en fase* y *fuera de fase*.

**fem.** Abreviatura de *fuerza electromotriz*.

**Fibra óptica.** Fibra transparente, por lo general de vidrio o plástico, que puede transmitir luz por todo su largo mediante reflexión interna total.

**Física cuántica.** Rama de la física que es el estudio general del micromundo de los fotones, átomos y núcleos.

**Fisión nuclear.** División de un núcleo atómico, en particular el de un elemento pesado como el uranio-235, en dos elementos más ligeros, acompañada de la liberación de mucha energía.

**Flotabilidad.** Pérdida aparente de peso de un objeto inmerso o sumergido en un fluido.

**Flotación.** Véase *principio de flotación*.

**Fluido.** Cualquier cosa que fluye; en particular, cualquier líquido, gas o plasma.

**Fluorescencia.** Propiedad de ciertas sustancias de absorber radiación de una frecuencia y volver a emitir radiación de una frecuencia más baja.

**FM.** Abreviatura de *frecuencia modulada*.

**Foco.** (a) Para una elipse, uno de los dos puntos para los cuales la suma de las distancias hacia cualquier punto sobre la elipse es una constante. Un satélite que orbita la Tierra se mueve en una elipse que tiene un foco en el centro de la Tierra. (b) Para óptica, un punto focal.

**Fórmula química.** Descripción en la que se usan números y símbolos de elementos para describir las proporciones de los elementos en un compuesto o reacción.

**Fosforescencia.** Tipo de emisión de luz que es igual a la fluorescencia, excepto por una demora entre la excitación y la desexcitación, lo que proporciona un brillo posterior que puede durar desde fracciones de segundo hasta horas, o incluso días, dependiendo de factores como el tipo de material y la temperatura.

**Fósforo.** Material en polvo, como el que se utiliza en la superficie interior de un tubo de luz fluorescente, que absorbe fotones ultravioleta y luego suministra luz visible.

**Fotón.** Luz que se manifiesta como una partícula; como un corpúsculo de luz.

**Fóvea.** Área de la retina que está en el centro del campo de visión; región de visión más nítida.

**Frecuencia.** Para un cuerpo o medio en vibración, número de vibraciones por unidad de tiempo. Para una onda, el número de crestas que pasan un punto particular por unidad de tiempo. La frecuencia se mide en hertz.

**Frecuencia fundamental.** Véase *tono parcial*.

**Frecuencia modulada (FM).** Tipo de modulación en el cual la frecuencia de una onda portadora varía por arriba y por debajo de su frecuencia normal por una cantidad que es proporcional a la amplitud de la señal impresa. En este caso, la amplitud de la onda portadora modulada permanece constante.

**Frecuencia natural.** Frecuencia a la que tiende a vibrar un objeto elástico si se perturba y luego se retira la fuerza perturbadora.

**Frente de onda.** Cresta, valle o cualquier porción continua de una onda bi- o tridimensional en la que las vibraciones son todas iguales al mismo tiempo.

**Fricción.** Fuerza que actúa para resistir el movimiento relativo (o intento de movimiento) de los objetos o materiales que están en contacto.

**Fricción estática.** Fuerza entre dos objetos que están en reposo relativo en virtud del contacto que tiende a oponerse al deslizamiento.

**Fuente de voltaje.** Dispositivo, como una pila seca, batería, generador o celda solar, que proporcionan una diferencia de potencial.

**Fuera de fase.** Término aplicado a dos ondas para las cuales la cresta de una onda coincide con un valle de la segunda onda. Sus efectos tienden a cancelarse mutuamente.

**Fuerza.** Cualquier empuje o tirón ejercido sobre un objeto; una cantidad vectorial que se mide en newtons. La fuerza no equilibrada cambia el movimiento de un objeto.

**Fuerza centrífuga.** Fuerza aparente hacia afuera sobre un cuerpo en rotación o que gira.

**Fuerza centrípeta.** Fuerza dirigida hacia el centro que hace que un objeto siga una trayectoria curva o circular.

**Fuerza de acción.** Una del par de fuerzas descrito en la tercera ley de Newton. Véanse también *leyes de movimiento de Newton, Ley 3*.

**Fuerza de flotación.** Fuerza ascendente neta ejercida por un fluido sobre un objeto sumergido o en inmersión.

**Fuerza de reacción.** Fuerza que es igual en intensidad y opuesta en dirección a la fuerza de acción, y una que actúa en forma simultánea sobre cualquier cosa que ejerza la fuerza de acción. Véase también *leyes de movimiento de Newton, Ley 3*.

**Fuerza de sostén.** Fuerza ascendente que equilibra el peso de un objeto sobre una superficie.

**Fuerza débil.** También llamada interacción débil, la fuerza dentro de un núcleo que se encarga de la emisión beta (electrón).

**Fuerza eléctrica.** Fuerza que una carga ejerce sobre otra. Cuando las cargas son del mismo signo, se repelen; cuando las cargas son opuestas, se atraen.

**Fuerza electromotriz (fem).** No es una fuerza, sino cualquier voltaje que origina una corriente eléctrica. Una batería o un generador es una fuente de fem.

**Fuerza fuerte.** Se conoce así a la fuerza que atrae los nucleones entre ellos dentro del núcleo; una fuerza que es muy fuerte a distancias cercanas pero disminuye rápido a medida que aumenta la distancia. También se le llama interacción fuerte.

**Fuerza magnética.** (a) Entre imanes, es la atracción mutua de polos magnéticos distintos y la repulsión entre polos magnéticos iguales. (b) Entre un campo magnético y una partícula cargada en movimiento, es una fuerza de deflexión debida al movimiento de la partícula: la fuerza de deflexión es perpendicular a las líneas del campo magnético y la dirección del movimiento. Esta fuerza es mayor cuando la partícula cargada se mueve perpendicular a las líneas de campo y es más pequeña (cero) cuando se mueve paralela a las líneas de campo.

**Fuerza neta.** Combinación de todas las fuerzas que actúan sobre un objeto.

**Fuerza normal.** Componente de la fuerza de soporte que es perpendicular a una superficie de soporte. En el caso de un objeto que descansa sobre una superficie horizontal, es la fuerza ascendente que equilibra el peso del objeto.

**Fulcro.** Punto pivote de una palanca.

**Fusible.** Dispositivo en un circuito eléctrico que rompe el circuito cuando la corriente es tan alta como para provocar un incendio.

**Fusión.** Cambio de fase de sólido a líquido; lo opuesto de la congelación. La fusión es un proceso diferente de la disolución, en la cual un sólido agregado se mezcla con un líquido y el sólido se disocia.

**Fusión nuclear.** Combinación de núcleos de átomos ligeros, como el hidrógeno, en núcleos más pesados, con frecuencia con la liberación de mucha energía. Véase también *fusión termonuclear*.

**Fusión termonuclear.** Fusión nuclear generada por temperaturas extremadamente altas; en otras palabras, la "soldadura" de núcleos atómicos mediante una alta temperatura.

**g.** (a) Abreviatura de *gramo*. (b) Cuando es *g* minúscula cursiva, símbolo de la aceleración debida a la gravedad (en la superficie de la Tierra, 9.8 $m/s^2$ hacia abajo). (c) Cuando es **g** minúscula negrilla, símbolo del vector del campo gravitacional (en la superficie de la Tierra, 9.8 N/kg hacia abajo). (d) Cuando es *G* mayúscula cursiva, símbolo de la *constante gravitacional universal* ($6.67 \times 10^{-11}$ $N \cdot m^2/kg^2$).

**Galvanómetro.** Instrumento utilizado para detectar corriente eléctrica. Con la combinación adecuada de resistores, puede convertirse en un amperímetro o un voltímetro. Un amperímetro se calibra para medir corriente eléctrica; un voltímetro se calibra para medir potencial eléctrico.

**Gas.** Fase de la materia distinta de la fase líquida que no tiene forma definida porque sus moléculas se mueven libremente y llenan cualquier espacio que esté disponible.

**Generador.** Máquina que produce corriente eléctrica, por lo general mediante una bobina giratoria en el interior de un campo magnético estacionario.

**Generador magnetohidrodinámico (MHD).** Dispositivo que genera electricidad por la interacción de un plasma y un campo magnético.

**Geodésica.** Trayectoria más corta entre puntos sobre cualquier superficie.

**Gramo (g).** Una unidad métrica de masa; un milésimo de kilogramo.

**Gravitación.** Atracción entre objetos debido a la masa. Véanse también *ley de gravitación universal* y *constante gravitacional universal*.

**Gravitón.** Cuanto de gravedad, similar en concepto al fotón como un cuanto de luz (no detectado al momento de este escrito).

**Grupo.** Elementos en la misma columna de la tabla periódica.

**h.** (a) Abreviatura de hora (aunque con frecuencia se usa hr). (b) Cuando es *h* cursiva, símbolo de la *constante de Planck*.

**Hadrón.** Partícula elemental que puede participar en interacciones de fuerza nuclear fuerte.

**Hecho.** Algo sobre lo que coinciden muy de cerca observadores competentes de un evento o una serie de observaciones de los mismos fenómenos.

**Hertz (Hz).** Unidad del SI de frecuencia. Un hertz es una vibración por segundo.

**Hipótesis.** Conjetura informada; explicación razonable de una observación o resultado experimental que no es plenamente aceptado como factual hasta que se pone a prueba una y otra vez con experimentos.

**Holograma.** Patrón de interferencia microscópico bidimensional que muestra imágenes ópticas tridimensionales.

**Humedad.** Medida de la cantidad de vapor de agua en el aire. La humedad absoluta es la masa de agua por volumen de aire. La humedad relativa es la humedad absoluta a dicha temperatura dividida entre el máximo posible, por lo general dado como porcentaje.

**Humedad relativa.** Razón entre la cantidad de vapor de agua que hay en el aire y la máxima cantidad de vapor de agua que podría haber en el aire a la misma temperatura, expresada como porcentaje.

**Hz.** Abreviatura de *hertz*.

**Imagen real.** Imagen formada por rayos de luz que convergen en la posición de la imagen. Una imagen real, a diferencia de una imagen virtual, puede mostrarse sobre una pantalla.

**Imagen virtual.** Imagen formada por rayos de luz que no convergen en la posición de la imagen. Los espejos, las lentes convergentes que se usan como lupas y las lentes divergentes producen imágenes

virtuales. La imagen puede verla un observador mas no puede proyectarse sobre una pantalla.

**Imán.** Cualquier objeto que tenga propiedades magnéticas, esto es, la capacidad de atraer objetos hechos de hierro u otras sustancias magnéticas. Véanse también *electromagnetismo* y *fuerza magnética*.

**Impulso.** Producto de la fuerza y el intervalo de tiempo durante el cual actúa la fuerza. El impulso produce un cambio en la cantidad de movimiento.

$$\text{Impulso} = Ft = \Delta(mv)$$

**Incandescencia.** Estado de brillo a alta temperatura, causado por los electrones que rebotan a través de dimensiones mayores que el tamaño de un átomo y emiten energía radiante en el proceso. La frecuencia pico de la energía radiante es proporcional a la temperatura absoluta de la sustancia calentada:

$$\overline{f} \sim T$$

**Índice de refracción (*n*).** Razón de la rapidez de la luz en el vacío con respecto a la rapidez de la luz en otro material.

$$n = \frac{\text{rapidez de la luz en el vacío}}{\text{rapidez de la luz en material}}$$

**Inducción.** Carga de un objeto sin contacto directo. Véanse también *inducción electrostática* e *inducción electromagnética*.

**Inducción electromagnética.** Fenómeno de producir un voltaje en un conductor al cambiar el campo magnético cerca del conductor. Si el campo magnético en el interior de una espira cerrada cambia de alguna forma, se induce un voltaje en la espira. La inducción de voltaje es, en realidad, resultado de un fenómeno más fundamental: la inducción de un campo eléctrico. Véase también *ley de Faraday*.

**Inducción electrostática.** Cargar un objeto o hacer que una carga se mueva en el interior de un objeto sin contacto directo.

**Inducido.** (a) Término aplicado a la carga eléctrica que se redistribuyó sobre un objeto debido a la presencia de un objeto cargado cercano. (b) Término aplicado a un voltaje, campo eléctrico o campo magnético que se crea debido a un cambio o movimiento a través de un campo magnético o un campo eléctrico.

**Inelástico.** Término aplicado a un material que no regresa a su forma original después de estirarse o comprimirse.

**Inercia.** Imperturbabilidad o resistencia aparente de un objeto para cambiar su estado de movimiento. La masa es la medida de la inercia.

**Inercia rotacional.** Renuencia o aparente resistencia de un objeto a cambiar su estado de rotación, determinado por la distribución de la masa del objeto y la ubicación del eje de rotación o revolución.

**Infrarrojas.** Ondas electromagnéticas con frecuencias menores que el rojo de la luz visible.

**Infrasónico.** Término aplicado a las frecuencias sonoras por debajo de 20 Hz, el límite inferior normal de audición humana.

**Ingeniería.** Tecnología dirigida al diseño, construcción y mantenimiento de obras, maquinaria, caminos, vías férreas, puentes, motores, todo tipo de vehículos desde microcarros hasta estaciones espaciales, y a la generación, transmisión y uso de energía eléctrica. Algunas de sus principales divisiones son: aeroespacial, química, civil, de comunicaciones, eléctrica, electrónica, de materiales, mecánica, de minas y estructural.

**Ingravidez.** Condición en la que un objeto no experimenta fuerza de sostén (y no ejerce fuerza sobre una báscula), como cuando está en caída libre o en órbita.

**Intensidad.** Potencia por metro cuadrado transportada por una onda sonora; con frecuencia se mide en decibeles.

**Interacción.** Acción mutua entre objetos, donde cada objeto ejerce una fuerza igual y opuesta sobre el otro.

**Interacción débil.** Véase *fuerza débil*.

**Interacción fuerte.** Véase *fuerza fuerte*.

**Interferencia.** Resultado de superponer diferentes ondas, generalmente con la misma longitud de onda. La interferencia constructiva resulta del reforzamiento cresta a cresta; la interferencia destructiva resulta de la cancelación cresta a valle. La interferencia de longitudes de onda seleccionadas produce colores conocidos como colores de interferencia. Véanse también *interferencia constructiva*, *interferencia destructiva*, *patrón de interferencia* y *onda estacionaria*.

**Interferencia constructiva.** Combinación de ondas de modo que dos o más ondas se traslapan para producir una onda resultante de amplitud aumentada. Véase también *interferencia*.

**Interferencia destructiva.** Combinación de ondas de modo que las crestas de una onda se traslapan con los valles de otra, lo que da por resultado una onda de amplitud reducida. Véase también *interferencia*.

**Interferómetro.** Dispositivo que usa la interferencia de ondas luminosas para medir distancias muy pequeñas con gran exactitud. Michelson y Morley usaron un interferómetro en sus famosos experimentos con luz.

**Inversamente.** Cuando dos valores cambian en direcciones opuestas –de modo que si una aumenta, la otra disminuye por el mismo factor– se dice que son inversamente proporcionales uno a otro.

**Inversión de temperatura.** Condición en la cual se detiene la convección ascendente del aire, en ocasiones porque una región superior de la atmósfera es más caliente que la región bajo ella.

**Inversión del polo magnético.** Cuando el campo magnético de un cuerpo astronómico invierte sus polos; esto es, el polo magnético norte se convierte en el polo magnético sur, y el polo magnético sur se convierte en el polo magnético norte.

**Ion.** Átomo (o grupo de átomos enlazados) con una carga eléctrica neta que se debe a la pérdida o ganancia de electrones. Un ión positivo tiene una carga positiva neta; un ión negativo tiene una carga negativa neta.

**Ionización.** Proceso de agregar o quitar electrones al núcleo atómico.

**Iridiscencia.** Fenómeno en el cual la interferencia de ondas luminosas de frecuencias mezcladas reflejadas de las partes superior e inferior de películas delgadas produce una gama de colores.

**Iris.** Parte coloreada del ojo que rodea la abertura negra por la cual pasa la luz. El iris regula la cantidad de luz que entra en el ojo.

**Isótopos.** Átomos cuyos núcleos tienen el mismo número de protones pero diferente número de neutrones.

**J.** Abreviatura de *joule*.

**Joule (J).** Unidad del SI de trabajo y de todas las demás formas de energía. Un joule de trabajo se realiza cuando una fuerza de 1 newton se ejerce sobre un objeto que se mueve 1 metro en la dirección de la fuerza.

**K.** (a) Abreviatura de *kelvin*. (b) Cuando es k minúscula, la abreviatura del prefijo *kilo-*. (c) Cuando es *k* minúscula cursiva, símbolo de la constante de proporcionalidad eléctrica en la *ley de Coulomb* (alrededor de $9 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$). (d) Cuando es *k* minúscula cursiva, símbolo de la constante de resorte en la *ley de Hooke*.

**Kelvin.** Unidad del SI de temperatura. Una temperatura medida en kelvins (símbolo K) indica el número de unidades arriba del cero absoluto. Las divisiones en las escalas Kelvin y Celsius son del mismo tamaño, de modo que un cambio de temperatura de 1 kelvin es igual a un cambio de temperatura de 1 grado Celsius.

**kilo.** Prefijo que significa mil, como en kilowatt o kilogramo.

**Kilocaloría (kcal).** Unidad de calor. Una kilocaloría es igual a 1,000 calorías, o la cantidad de calor necesario para aumentar en 1°C la temperatura de 1 kilogramo de agua; es igual a una Caloría alimenticia.

**Kilogramo (kg).** Unidad de masa fundamental del SI; es igual a 1,000 gramos. Un kilogramo es casi la cantidad de masa en 1 litro de agua a 4°C.

**Kilómetro (km).** 1,000 *metros*.

**Kilowatt (kW).** 1,000 *watts*.

**Kilowatt-hora (kWh).** Cantidad de energía consumida en 1 hora a la tasa de 1 kilowatt.

**km.** Abreviatura de *kilómetro*.

**kPa.** Abreviatura de *kilopascal*. Véase *pascal*.

**kWh.** Abreviatura de *kilowatt-hora*.

**L.** Abreviatura de *litro*; en algunos libros de texto se usa la l minúscula.

**Lámpara fluorescente compacta (CFL).** Versión miniatura de una lámpara fluorescente, por lo general con forma de espiral.

**Láser.** Instrumento óptico que produce un haz de luz coherente; esto es: luz en la cual todas las ondas tienen la misma frecuencia, fase y dirección. La palabra es un acrónimo de ***l**ight **a**mplification by **s**timulated **e**mission of **r**adiation:* amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación.

**Lente.** Pieza de vidrio u otro material transparente que puede llevar luz a un foco.

**Lente convergente.** Lente que es más gruesa en medio que en los bordes y refracta rayos paralelos de luz que pasan a través de ésta hacia un foco. Véase también *lente divergente*.

**Lente divergente.** Lente más delgado en medio que en los bordes, lo que hace que los rayos paralelos de luz que lo atraviesan diverjan como si provinieran de un punto. Véase también *lente convergente*.

**Lentes acromáticos.** Véase *aberración cromática*.

**Leptón.** Clase de partículas elementales que no están involucradas con la fuerza nuclear fuerte. Incluye al electrón y su neutrino, el muon y su neutrino, y el tau y su neutrino.

**Ley.** Hipótesis o enunciado general acerca de la relación de cantidades naturales que se pusieron a prueba una y otra vez y no se han contradicho; también conocida como *principio*.

**Ley de Boyle.** El producto de presión y volumen es una constante para una masa dada de gas confinado, sin importar los cambios de presión o volumen por separado, siempre y cuando la temperatura permanezca invariable.

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

**Ley de conservación de la cantidad de movimiento.** En ausencia de una fuerza externa, la cantidad de movimiento de un sistema permanece invariable. Por tanto, la cantidad de movimiento antes de un evento que sólo implica fuerzas internas es igual a la cantidad de movimiento después del evento:

$$mv_{\text{(antes de evento)}} = mv_{\text{(después de evento)}}$$

**Ley de Coulomb.** Enunciado sobre la relación entre la fuerza eléctrica, las cargas y la distancia: la fuerza eléctrica entre dos cargas varía directamente como el producto de las cargas ($q$) e inversamente como el cuadrado de la distancia entre ellas ($k$ es la constante de proporcionalidad $9 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$). Si las cargas son de igual signo, la fuerza es de repulsión; si las cargas son diferentes, la fuerza es de atracción.

$$F = k\frac{q_1q_2}{d^2}$$

**Ley de Faraday.** El voltaje inducido en una bobina es proporcional al producto de su número de espiras, el área transversal de cada espira y la tasa a la que cambia el campo magnético dentro de dichas espiras. En general, un campo eléctrico se induce en cualquier región del espacio donde un campo magnético cambia con el tiempo. La magnitud del campo eléctrico inducido es proporcional a la tasa a la que cambia el campo magnético. Véase también *contraparte de Maxwell a la ley de Faraday*.

$$\text{Voltaje inducido} \sim \text{número de espiras} \times \frac{\text{cambio en campo magnético}}{\text{cambio en el tiempo}}$$

**Ley de gravitación universal.** Para cualquier par de objetos, cada partícula atrae al otro objeto con una fuerza que es directamente proporcional al producto de sus masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros de masa, donde $F$ es la fuerza, $m$ es la masa, $d$ es la distancia y $G$ es la constante de gravitación universal:

$$F \sim \frac{m_1m_2}{d^2} \text{ o } F = G\frac{m_1m_2}{d^2}$$

**Ley de Hooke.** La distancia de estiramiento u opresión (extensión o compresión) de un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada. Donde $\Delta x$ es el cambio de longitud y $k$ es la constante de resorte,

$$F = k\Delta x$$

**Ley de inercia.** Véase *leyes de Newton de movimiento*, *Ley 1*.

**Ley de Newton de enfriamiento.** La tasa de enfriamiento de un objeto (ya sea por conducción, convección o radiación) es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperatura entre el objeto y sus alrededores.

**Ley de Ohm.** La corriente en un circuito es directamente proporcional al voltaje aplicado a través del circuito y es inversamente proporcional a la resistencia del circuito.

$$\text{Corriente} = \frac{\text{voltaje}}{\text{resistencia}}$$

**Ley de reflexión.** El ángulo de incidencia para una onda que golpea una superficie es igual al ángulo de reflexión. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal respecto de la superficie están todos en el mismo plano. Esto es válido para ondas que se reflejan tanto parcial como totalmente. Véanse también *ángulo de incidencia* y *ángulo de reflexión*.

**Ley del inverso al cuadrado.** Ley que relaciona la intensidad de un efecto con el inverso al cuadrado de la distancia desde la causa. Los fenómenos gravitacionales, eléctricos, magnéticos, luminosos, sonoros y de radiación siguen la ley del inverso al cuadrado.

$$\text{Intensidad} \sim \frac{1}{\text{distancia}^2}$$

**Leyes de Kepler.** *Ley 1:* La trayectoria de cada planeta alrededor del Sol es una elipse con el Sol en un foco.
*Ley 2:* La línea que va del Sol a cualquier planeta barre áreas iguales de espacio en intervalos de tiempo iguales.
*Ley 3:* El cuadrado del periodo orbital de un planeta es directamente proporcional al cubo de la distancia promedio del planeta respecto del Sol ($T^2 \sim r^3$ para todos los planetas).

**Leyes de Newton de movimiento.** *Ley 1:* Todo objeto continúa en un estado de reposo, o de rapidez uniforme en línea recta, a menos que sobre él actúe una fuerza neta distinta de cero; también conocida como ley de inercia.
*Ley 2:* La aceleración producida por una fuerza neta sobre un objeto es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza neta, está en la misma dirección que la fuerza neta y es inversamente proporcional a la masa del objeto.
*Ley 3:* Siempre que un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, el segundo objeto ejerce una fuerza igual y opuesta sobre el primero.

**Límite elástico.** Distancia de estiramiento o compresión más allá de la cual un material elástico no regresará a su estado original.

**Línea de corriente.** Trayectoria suave de una pequeña región de fluido en un flujo estacionario.

**Líneas de absorción.** Líneas oscuras que aparecen en un espectro de absorción. El patrón de líneas es único para cada elemento.

**Líneas de campo magnético.** Líneas que muestran la forma de un campo magnético. Una brújula colocada en tal línea girará de modo que la aguja se alinee con ella.

**Líneas de Fraunhofer.** Líneas oscuras visibles en el espectro del Sol o una estrella.

**Líneas espectrales.** Líneas de color que se forman cuando la luz pasa por una rendija y luego a través de un prisma o rejilla de difracción, por lo general en un espectroscopio. El patrón de líneas es único para cada elemento.

**Líquida.** Fase de la materia entre las fases sólida y gaseosa en la que la materia posee un volumen definido mas no una forma definida: adopta la forma de su contenedor.

**Litro (L).** Unidad métrica de volumen; igual a 1,000 $cm^3$.

**Longitud de onda.** Distancia entre crestas, valles o partes idénticas sucesivas de una onda.

**Longitud focal.** Distancia entre el centro de una lente y cualquier punto focal; como la distancia entre un espejo y su punto focal.

**Luces del norte.** Véase *aurora boreal*.

**Luz.** Parte visible del espectro electromagnético.

**Luz blanca.** Luz, como la luz solar, que es una combinación de todos los colores. Bajo la luz blanca, los objetos blancos se ven blancos y los objetos de color se ven en sus colores individuales.

**Luz coherente.** Luz de una sola frecuencia con todos los fotones exactamente en fase y con movimiento en la misma dirección. Los láseres producen luz coherente. Véanse también *luz incoherente* y *láser*.

**Luz incoherente.** Luz que contiene ondas con un conglomerado de frecuencias, fases y posiblemente direcciones. Véanse también *luz coherente* y *láser*.

**Luz monocromática.** Luz constituida con un solo color y, por tanto, ondas de una sola longitud de onda y frecuencia.

**Luz visible.** Parte del espectro electromagnético que puede ver el ojo humano.

**m.** Abreviatura de *metro*.

**Magnetismo.** Fenómenos asociados a los campos magnéticos. Véanse también *electromagnetismo* y *fuerza magnética*.

**Máquina.** Dispositivo que aumenta (o disminuye) una fuerza o simplemente cambia la dirección de una fuerza.

**Máquina térmica.** Dispositivo que usa calor como entrada y suministra trabajo mecánico como salida, o que usa trabajo como entrada y mueve calor "cuesta arriba" desde un lugar más frío hasta uno más caliente.

**Marco de referencia.** Sitio (por lo general un conjunto de ejes coordenados) con respecto al cual pueden describirse la posición y el movimiento.

**Marco de referencia inercial.** Sitio que no sufre aceleración y donde se sostienen con exactitud las leyes de Newton.

**Marea muerta o de cuadratura.** Marea que ocurre cuando la Luna está a medio camino entre una Luna nueva y una Luna llena, en cualquier dirección. Las mareas debidas al Sol y la Luna se cancelan de manera parcial, de modo que las mareas altas son más bajas que el promedio y las mareas bajas no son tan bajas como el promedio. Véase también *marea viva o de sicigia*.

**Marea viva o de sicigia.** Marea alta o baja que ocurre cuando el Sol, la Tierra y la Luna se alinean de modo que coinciden las mareas debidas al Sol y la Luna, lo que hace que las mareas altas sean más altas que el promedio y las mareas bajas sean más bajas que el promedio. Véase también *marea muerta o de cuadratura*.

**Masa (m).** Cantidad de materia en un objeto; la medición de la inercia o resistencia que muestra un objeto en respuesta a cualquier esfuerzo realizado para arrancarlo, detenerlo o cambiar de alguna manera su estado de movimiento; una forma de energía.

**Masa atómica.** En la tabla periódica, la masa atómica es la masa promedio de los átomos de un elemento, calculada a partir de la abundancia relativa de isótopos en un elemento que se presenta de manera natural.

**Masa crítica.** Masa mínima de material fisionable en un reactor nuclear o bomba nuclear que sostendrá una reacción en cadena. Una masa subcrítica es aquella en la que la reacción en cadena desaparece. Una masa supercrítica es aquella en la que la reacción en cadena se acumula de manera explosiva.

**Masa subcrítica.** Véase *masa crítica*.

**Masa supercrítica.** Véase *masa crítica*.

**Máser.** Instrumento que produce un haz coherente de microondas. La palabra es un acrónimo de ***m**icrowave **a**mplification by **s**timulated **e**mission of **r**adiation:* amplificación de microondas mediante emisión estimulada de radiación.

**Materia oscura.** Materia no vista y no identificada que es evidente por su tirón gravitacional sobre las estrellas en las galaxias.

**Mecánica cuántica.** Rama de la física que se ocupa del micromundo atómico con base en funciones de onda y probabilidades, introducida por Max Planck (1900) y desarrollada por Werner Heisenberg (1925), Erwin Schrödinger (1926) y otros.

**mega-** Prefijo que significa millón, como en megahertz o megajoule.

**Mesón.** Partícula elemental con un número de masa cero; puede participar en la interacción nuclear fuerte.

**Método científico.** Método ordenado para adquirir, organizar y aplicar nuevo conocimiento.

**Metro (m).** Unidad de longitud estándar del SI (3.28 pies).

**MeV.** Abreviatura de millón de *electrón-volts*, una unidad de energía o, de manera equivalente, una unidad de masa.

**Mezcla.** Las sustancias se mezclan sin combinarse químicamente.

**MHD.** Abreviatura de *magnetohidrodinámica*.

**mi.** Abreviatura de milla.

**Microondas.** Ondas electromagnéticas que tienen frecuencias mayores que las ondas de radio, pero menores que las ondas infrarrojas.

**Microscopio.** Instrumento óptico que forma imágenes agrandadas de objetos muy pequeños.

**min.** Abreviatura de minuto.

**MJ.** Abreviatura de megajoules, 1 millón de *joules*.

**Modelo.** Representación de una idea creada para hacer la idea más comprensible.

**Modelo de capas del átomo.** Modelo en el cual los electrones de un átomo se representan como agrupados en capas concéntricas alrededor del núcleo.

**Modulación.** Imprimir un sistema de ondas de señal en una onda portadora de mayor frecuencia; amplitud modulada (AM) para señales de amplitud y frecuencia modulada (FM) para señales de frecuencia.

**Molécula.** Dos o más átomos del mismo o diferentes elementos enlazados para formar una partícula más grande.

**Momento de torsión.** Producto de la fuerza y la distancia de brazo de palanca, que tiende a producir una aceleración rotacional.

Momento de torsión = distancia brazo de palanca $\times$ fuerza

**Monopolo magnético.** Partícula hipotética que tiene un solo polo magnético norte o sur, análoga a una carga eléctrica positiva o negativa.

**Movimiento armónico simple.** Movimiento vibratorio o periódico, como el de un péndulo, en el que la fuerza que actúa sobre el cuerpo en vibración es proporcional a su desplazamiento de su posición de equilibrio central y actúa hacia dicha posición.

**Movimiento browniano.** Movimiento azaroso de pequeñas partículas suspendidas en un gas o en un líquido que resulta de colisiones con las moléculas de movimiento rápido del gas o líquido.

**Movimiento lineal.** Movimiento en línea recta, a diferencia del movimiento circular, angular o rotacional.

**Movimiento oscilatorio.** Repetición del movimiento vibratorio de ida y vuelta, como el de un péndulo.

**Muon.** Partícula elemental de la familia de los leptones.

**Música.** En términos científicos, sonido asociado a tonos periódicos y regularidad.

**N.** Abreviatura de *newton*.

**Nanómetro.** Unidad métrica de longitud que es $10^{-9}$ metro (un mil millonésimo de metro).

**Neutrino.** Partícula elemental en la clase de las partículas elementales llamadas leptones. No tiene carga y casi no tiene masa; tres tipos —el electrón, el muon y los neutrinos tau— son las partículas de alta rapidez más comunes en el Universo; cada segundo más de mil millones atraviesan sin obstáculos a cada persona.

**Neutrón.** Partícula eléctricamente neutra que es uno de los dos tipos de nucleones que componen un núcleo atómico.

**Newton (N).** Unidad de fuerza del SI. Un newton es la fuerza aplicada a 1 kilogramo masa que producirá una aceleración de 1 metro por segundo por segundo.

**Nodo.** Cualquier parte de una onda estacionaria que permanece estacionaria; una región de energía mínima o cero.

**Normal.** En ángulos rectos a, o perpendicular a. Una fuerza normal actúa en ángulos rectos respecto de la superficie sobre la que actúa. En óptica, una normal define la línea perpendicular a una superficie sobre la cual se miden los ángulos de los rayos de luz.

**Núcleo.** Centro con carga positiva de un átomo, que contiene protones y neutrones y tiene casi la totalidad de la masa de todo el átomo, pero sólo una pequeña fracción del volumen.

**Nucleón.** Principal componente del núcleo; un neutrón o un protón; nombre colectivo para alguno de ellos o ambos.

**Número atómico.** Número asociado a los átomos de un elemento dado, igual al número de protones en el núcleo o, de manera equivalente, al número de electrones en la nube de electrones de un átomo neutro.

**Número de Avogadro.** $6.02 \times 10^{23}$ moléculas.

**Número de masa.** Véase *masa atómica*.

**Número de masa atómica.** Número asociado a un átomo, igual al número de nucleones (protones más neutrones) en el núcleo.

**Número Mach.** Razón de la rapidez de un objeto con respecto a la rapidez del sonido. Por ejemplo, un avión que viaja *a* la rapidez del sonido se clasifica Mach 1.0; si viaja al *doble* de la rapidez del sonido, Mach 2.0.

**Objetivo.** En un dispositivo óptico que usa lentes compuestos, el lente más cercano al objeto observado.

**Octava.** En música, el octavo tono completo arriba o abajo de un tono dado. El tono que está una octava arriba tiene el doble de vibraciones por segundo que el tono original; el tono que está una octava abajo tiene la mitad de las vibraciones por segundo.

**Ocular.** Lente de un telescopio que está más cerca del ojo; amplifica la imagen real formada por el primer lente.

**Ohm (Ω).** Unidad del SI de resistencia eléctrica. Un ohm es la resistencia de un dispositivo que extrae una corriente de 1 ampere cuando a través de él se aplica un voltaje de 1 volt.

**Onda.** Un "contoneo en espacio y tiempo"; una perturbación que se repite con regularidad en un medio o un campo que transporta energía de un lugar al siguiente sin ningún transporte neto de materia.

**Onda de choque.** Onda con forma de cono producida por un objeto que se mueve a rapidez supersónica a través de un fluido.

**Onda de proa.** Onda con forma de V producida por un objeto que se mueve sobre una superficie líquida más rápido que la rapidez de la onda.

**Onda electromagnética.** Onda portadora de energía emitida por cargas en vibración (a menudo electrones) que se compone de campos eléctrico y magnético en oscilación que se regeneran entre sí. Ondas de radio, microondas, radiación infrarroja, luz visible, radiación ultravioleta, rayos X y rayos gamma son todas ondas electromagnéticas.

**Onda estacionaria.** Patrón de onda estacionaria formado en un medio cuando dos conjuntos de ondas idénticas pasan a través del medio en direcciones opuestas. La onda parece no viajar. El resultado de la interferencia de onda.

**Onda gravitacional.** Perturbación gravitacional que se propaga a través del espacio-tiempo producida por una masa en movimiento (no detectada al momento de este escrito).

**Onda longitudinal.** Onda en la que cada una de las partículas de un medio vibran de ida y vuelta en la dirección (paralela) en la que viaja la onda, por ejemplo, el sonido.

**Onda plana polarizada.** Onda transversal confinada a un solo plano de vibración.

**Onda portadora.** Onda de radio de alta frecuencia modificada por una onda de frecuencia más baja.

**Onda sinusoidal.** La más simple de las ondas, que tiene una sola frecuencia y la forma de una curva seno.

**Onda transversal.** Onda con vibración en ángulos rectos respecto de la dirección en que viaja la onda. La luz consiste en ondas transversales.

**Ondas de calor.** Véase *ondas infrarrojas*.

**Ondas de materia.** Véase *ondas de materia de De Broglie*.

**Ondas de materia de De Broglie.** Todas las partículas tienen propiedades ondulatorias; en la ecuación de De Broglie, el producto de la cantidad de movimiento y la longitud de onda es igual a la constante de Planck.

**Ondas de radio.** Ondas electromagnéticas con la frecuencia más larga.

**Ondas infrarrojas.** Ondas electromagnéticas que tienen una frecuencia menor que la luz roja visible.

**Opaco.** Término aplicado a los materiales que absorben luz sin reemisión o reflexión y, en consecuencia, no permiten luz a través de ellos.

**Órbita geosíncrona.** Órbita de un satélite en la que el satélite orbita la Tierra una vez al día. Cuando se mueve hacia el oeste, el satélite permanece en un punto fijo (aproximadamente a 36,000 km) sobre la superficie de la Tierra.

**Oscilación.** Igual que la vibración: un movimiento repetitivo de ida y vuelta en torno a una posición de equilibrio. Tanto la oscilación como la vibración se refieren a un movimiento periódico, esto es, un movimiento que se repite de manera regular.

**Oxidación.** Proceso químico en el que un elemento o molécula pierde uno o más electrones.

**Ozono.** Gas de moléculas de oxígeno compuesto de tres, en vez de los dos átomos de oxígeno usuales. El $O_3$ se forma cuando la molécula de oxígeno estable ($O_2$) se divide mediante radiación UV o descarga eléctrica. Se encuentra de manera natural en una delgada capa en la atmósfera superior.

**Pa.** Abreviatura de la unidad *pascal* del SI.

**Palanca.** Máquina simple hecha de una barra que gira en torno a un punto fijo llamado fulcro.

**Parábola.** Trayectoria curva seguida de un proyectil que actúa sólo bajo la influencia de la gravedad.

**Paralaje.** Desplazamiento aparente de un objeto cuando lo ve un observador desde dos posiciones diferentes; con frecuencia se usa para calcular la distancia de las estrellas.

**Partícula alfa.** Núcleo de un átomo de helio, que consiste en dos neutrones y dos protones, expulsado por ciertos núcleos radiactivos.

**Partícula beta.** Electrón (o positrón) emitido durante el decaimiento radiactivo de ciertos núcleos.

**Partículas elementales.** Partículas subatómicas; los componentes básicos de toda la materia, que consisten en dos clases de partículas: quarks y leptones.

**Pascal (Pa)** Unidad de presión del SI. Un pascal de presión ejerce una fuerza normal de 1 newton por metro cuadrado. Un kilopascal (kPa) es 1,000 pascales.

**Patrón de interferencia.** Patrón formado por el traslape de dos o más ondas que llegan al mismo tiempo a una región.

**Penumbra.** Región de una sombra parcialmente iluminada donde se bloquea parte, mas no toda, la luz proveniente de una fuente. Véase también *umbra*.

**Percusión.** En instrumentos musicales, el golpeteo de un objeto contra otro.

**Perigeo.** Punto en una órbita elíptica más cercano al foco en torno al cual tiene lugar el orbitar. Véase también *apogeo*.

**Periodo.** En general, el tiempo necesario para completar un solo ciclo. (a) Para un movimiento orbital, el tiempo necesario para recorrer una órbita completa. (b) Para vibraciones u ondas, el tiempo necesario para un ciclo completo, igual a 1/frecuencia.

**Perturbación.** Desviación de un objeto en órbita (por ejemplo, un planeta) de su trayectoria alrededor de un centro de fuerza (por ejemplo, el Sol) causada por la acción de otro centro de fuerza (por ejemplo, otro planeta).

**Peso.** La fuerza que un objeto ejerce sobre una superficie de sostén (o, si está suspendido, sobre una cuerda de soporte), con frecuencia, mas no siempre, debida a la fuerza de gravedad.

**Pigmento.** Partículas finas que selectivamente absorben luz de ciertas frecuencias y selectivamente transmiten y/o reflejan otras.

**Plano focal.** Plano, perpendicular al eje principal, que atraviesa un punto focal de un lente o espejo. Para una lente convergente o un espejo cóncavo, cualquier rayo de luz paralelo incidente converge en un punto en alguna parte sobre un plano focal. Para una lente divergente o un espejo convexo, los rayos parecen provenir de un punto sobre un plano focal.

**Plasma.** Cuarta fase de la materia, además de sólido, líquido y gas. En la fase de plasma, que existe principalmente a altas temperaturas, la materia consiste en iones con carga positiva y electrones libres.

**Polarización.** Alineamiento de vibraciones en una onda transversal, por lo general mediante la filtración de las ondas que vibran en todos los planos excepto en uno. Véanse también *onda plana polarizada* y *cristal dicroico*.

**Polea.** Rueda que actúa como una palanca utilizada para cambiar la dirección de una fuerza. Una polea o sistema de poleas también puede multiplicar fuerzas.

**Polo magnético.** Una de las regiones en un imán que produce fuerzas magnéticas.

**Positrón.** Antipartícula de un electrón; un electrón con carga positiva.

**Postulados de la relatividad especial.** *Primero:* Todas las leyes de la naturaleza son iguales en todos los marcos de referencia que se mueven de manera uniforme.
*Segundo:* La rapidez de la luz en el espacio libre tiene el mismo valor medido sin importar el movimiento de la fuente o el movimiento del observador; esto es: la rapidez de la luz es invariable.

**Potencia.** Tasa a la que se realiza trabajo o se transforma energía; igual al trabajo realizado o la energía transformada dividida entre el tiempo; se mide en watts.

$$\text{Potencia} = \frac{\text{trabajo}}{\text{tiempo}}$$

**Potencia eléctrica.** Tasa de transferencia de energía eléctrica o tasa de realización de trabajo, que puede calcularse como el producto de la corriente y el voltaje.

$$\text{Energía eléctrica} = \text{corriente} \times \text{voltaje}$$

**Potencia solar.** Energía por unidad de tiempo derivada del Sol. Véase también *constante solar*.

**Potencial eléctrico.** Energía potencial eléctrica (en joules) por unidad de carga (en coulombs) en una posición en un campo eléctrico; se mide en volts (1 V = 1 J/C) y a menudo se le denomina voltaje.

**Precesión.** Bamboleo de un objeto giratorio, de forma tal que su eje de rotación traza un cono.

**Presión.** Fuerza por área superficial, donde la fuerza es normal (perpendicular) a la superficie; se mide en pascales. Véase también *presión atmosférica*.

$$\text{Presión} = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}}$$

**Presión atmosférica.** Presión ejercida contra los cuerpos sumergidos en la atmósfera, que resulta del peso del aire que presiona hacia abajo desde arriba. A nivel del mar, la presión atmosférica es de aproximadamente 101 kPa.

**Principio.** Hipótesis o enunciado general acerca de la relación de las cantidades naturales puestas a prueba una y otra vez, y que no se han contradicho; también conocido como ley.

**Principio de Arquímedes.** Enunciado sobre la relación entre la flotabilidad y el fluido desplazado: un objeto sumergido es sostenido por una fuerza igual al peso del fluido que desplaza.

**Principio de Avogadro.** Volúmenes iguales de todos los gases a la misma temperatura y presión contienen el mismo número de moléculas, $6.02 \times 10^{23}$ en 1 mol (una masa en gramos igual a la masa molecular de la sustancia en unidades de masa atómica).

**Principio de De Bernoulli.** La presión de un fluido a lo largo de una línea de corriente dada disminuye a medida que aumenta la rapidez del fluido.

**Principio de combinación de Ritz.** Para un elemento, las frecuencias de algunas líneas espectrales son o la suma o la diferencia de las frecuencias de otras dos líneas en el espectro de dicho elemento.

**Principio de correspondencia.** Si una nueva teoría es válida, debe explicar los resultados verificados de la teoría anterior en la región donde ambas teorías se aplican.

**Principio de equivalencia.** Las observaciones realizadas en un marco de referencia acelerado son indistinguibles de las observaciones realizadas en un campo gravitacional.

**Principio de Fermat de menor tiempo.** La luz toma la trayectoria que necesita menos tiempo cuando va de un lugar a otro.

**Principio de flotación.** Un objeto flotante desplaza un peso de fluido igual a su propio peso.

**Principio de Huygens.** Las ondas de luz que se dispersan desde una fuente luminosa pueden considerarse como una superposición de diminutas ondas secundarias.

**Principio de incertidumbre.** Principio formulado por Heisenberg, en el que afirma que la constante de Planck, $h$, establece un límite sobre la exactitud de la medición a nivel atómico. Por consiguiente, no es posible medir con exactitud la posición ni la cantidad de movimiento de una partícula al mismo tiempo, o la energía y el tiempo asociados a una partícula simultáneamente.

**Principio de Pascal.** Los cambios de presión en cualquier punto en un fluido encerrado en reposo se transmiten sin disminución a todos los puntos en el fluido y actúan en todas direcciones.

**Principio de superposición.** En una situación donde más de una onda ocupa el mismo espacio al mismo tiempo, los desplazamientos se suman en cada punto.

**Prisma.** Sólido triangular hecho de un material transparente, como el vidrio, que separa la luz incidente mediante refracción en sus colores componentes. Dichos colores componentes suelen denominarse espectro.

**Proceso adiabático.** Proceso, con frecuencia de expansión o compresión rápidas, en el que no entra ni sale calor de un sistema. Como resultado, un líquido o gas se enfriará si experimenta una expansión, o se calentará si experimenta una compresión.

**Protón.** Partícula con carga positiva que es uno de los dos tipos de nucleones en el núcleo de un átomo.

**Proyectil.** Cualquier objeto que se mueva a través del aire o del espacio, sobre el que sólo actúa la gravedad (y la resistencia del aire, si la hay).

**Pseudociencia.** Ciencia falsa que pretende ser ciencia real.

**Pulida.** Descripción de una superficie que es tan suave que las distancias entre elevaciones sucesivas de la superficie son menores que aproximadamente un octavo de la longitud de onda de la luz u otra onda incidente de interés. El resultado es muy poca reflexión difusa.

**Punto ciego.** Área de la retina donde todos los nervios que transportan información visual salen del ojo y van al cerebro; ésta es una región donde no hay visión.

**Punto focal.** Para un lente convergente o un espejo cóncavo, el punto donde convergen los rayos de luz paralelos al eje principal. Para un lente divergente o un espejo convexo, el punto desde el cual parecen provenir tales rayos.

**Pupila.** Abertura en el globo ocular por la cual pasa la luz.

**Quark.** Una de las dos clases de partículas elementales (la otra es el leptón). Dos de los seis quarks (arriba y abajo) son los componentes fundamentales de los nucleones (protones y neutrones).

**rad.** Unidad usada para medir una dosis de radiación; la cantidad de energía (en centijoules) absorbida de la radiación ionizante por kilogramo de material expuesto.

**Radiación.** (a) Energía transmitida por ondas electromagnéticas. (b) Las partículas cedidas por los átomos radiactivos como el uranio. No confundir radiación con radiactividad.

**Radiación electromagnética.** Transferencia de energía por las rápidas oscilaciones de campos electromagnéticos, que viajan en forma de ondas llamadas ondas electromagnéticas.

**Radiación terrestre.** Energía radiante emitida desde la Tierra.

**Radiactividad.** Proceso del núcleo atómico que resulta en la emisión de partículas energéticas. Véase *radiación*.

**Radiactivo.** Término aplicado a un átomo que tiene un núcleo inestable que puede emitir de manera espontánea una partícula.

**Radioterapia.** Uso de la radiación como tratamiento para destruir células cancerosas.

**Rapidez.** Qué tan rápido se mueve algo; la distancia que recorre un objeto por unidad de tiempo; la magnitud de la velocidad. Véanse también *rapidez promedio*, *rapidez lineal*, *rapidez rotacional* y *rapidez tangencial*.

$$\text{Rapidez} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$$

**Rapidez de escape.** Rapidez que debe alcanzar un proyectil, sonda espacial u otro objeto para escapar de la influencia gravitacional de la Tierra o del cuerpo celeste al cual esté más atraído.

**Rapidez de onda.** Rapidez con la que las ondas pasan por un punto particular.

$$\text{Rapidez de onda} = \text{frecuencia} \times \text{longitud de onda}$$

**Rapidez instantánea.** Rapidez en cualquier instante.

**Rapidez lineal.** Distancia de trayectoria recorrida por unidad de tiempo; también se denomina simplemente rapidez.

**Rapidez promedio.** Distancia de la trayectoria dividida entre el intervalo de tiempo.

$$\text{Rapidez promedio} = \frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

**Rapidez rotacional.** Número de rotaciones o revoluciones por unidad de tiempo; con frecuencia se mide en rotaciones o revoluciones por segundo o minuto.

**Rapidez tangencial.** Rapidez lineal a lo largo de una trayectoria curva.

**Rapidez terminal.** Rapidez que logra un objeto en la que las fuerzas de resistencia, con frecuencia la resistencia del aire, compensan las fuerzas de deriva, de modo que el movimiento es sin aceleración.

**Rarefacción.** Región de presión reducida en una onda longitudinal.

**Rayo.** Haz delgado de luz. También, una línea dibujada que muestra la trayectoria de la luz en los diagramas de rayos ópticos. Un haz de radiación (por ejemplo, rayo beta).

**Rayo alfa.** Haz de partículas alfa (núcleos de helio) expulsados por ciertos núcleos radiactivos.

**Rayo beta.** Haz de partículas beta (electrones o positrones) emitido por ciertos núcleos radiactivos.

**Rayo cósmico.** Una de las varias partículas de alta rapidez que viajan por todo el Universo y se originan en eventos violentos en las estrellas.

**Rayo gamma.** Radiación electromagnética de alta frecuencia emitida por los núcleos atómicos.

**Rayo X.** Radiación electromagnética, superior en frecuencia a la ultravioleta, emitida por los átomos cuando los electrones de los orbitales más internos experimentan una excitación.

**Reacción en cadena.** Reacción autosostenida que, una vez iniciada, proporciona de manera constante la energía y la materia necesarias para continuar la reacción.

**Reacción química.** Proceso de reordenamiento de átomos que transforma una molécula en otra.

**Reactor nuclear.** Aparato en el que tienen lugar reacciones controladas de fisión o fusión nucleares.

**Reactor reproductor.** Reactor de fisión nuclear que no sólo produce electricidad sino que produce más combustible nuclear que el que consume al convertir un isótopo de uranio no fisionable en un isótopo de plutonio fisionable. Véase también *reactor nuclear*.

**Reflexión.** Regreso de los rayos de luz desde una superficie en tal forma que el ángulo al que regresa un rayo dado es igual al ángulo al que golpea la superficie. Cuando la superficie reflejante es irregular, la luz regresa en direcciones irregulares; ésta es reflexión difusa. En general, el rebote de regreso de una partícula u onda que golpea la frontera entre dos medios.

**Reflexión difusa.** Reflexión de ondas en muchas direcciones desde una superficie rugosa. Véase también *pulida*.

**Reflexión interna total.** El 100% de reflexión (sin transmisión) de la luz que golpea la frontera entre dos medios a un ángulo mayor que el ángulo crítico.

**Refracción.** Plegamiento de un rayo de luz oblicuo cuando éste pasa de un medio transparente a otro. Esto es provocado por una diferencia en la rapidez de la luz en los medios transparentes. En general, el cambio de dirección de una onda mientras cruza la frontera entre dos medios en los que la onda viaja con diferentes rapideces.

**Regla de equilibrio.** $\Sigma F = 0$. Sobre un objeto o sistema de objetos en equilibrio mecánico, la suma de fuerzas es igual a cero. Además, $\Sigma\tau = 0$; la suma de los momentos de torsión es igual a cero.

**Rehielo.** Proceso de fundido bajo presión y la posterior recongelación cuando se quita la presión.

**Rejilla de difracción.** Serie de rendijas o surcos paralelos estrechamente espaciados que se usa para separar colores de luz mediante interferencia.

**Relatividad.** Véanse *teoría de la relatividad especial*, *postulados de la teoría de la relatividad especial* y *teoría de la relatividad general*.

**Relativista.** Perteneciente a la teoría de la relatividad; que se aproxima a la rapidez de la luz.

**Relativo.** Considerado en relación con algo más, dependiendo del punto de vista o marco de referencia. En ocasiones se expresa "con respecto a".

**rem.** Acrónimo de **r**oentgen **e**quivalent **m**an (roentgen equivalente en humano); unidad utilizada para medir el efecto de la radiación ionizante sobre los seres humanos.

**Remolino.** Trayectorias ensortijadas cambiantes en el flujo turbulento de un fluido.

**Resistencia.** Véase *resistencia eléctrica*.

**Resistencia al deslizamiento.** Fuerza de contacto que tiende a retardar el movimiento producido por el frotamiento mutuo de la superficie de un objeto en movimiento con el material sobre el cual se desliza.

**Resistencia del aire.** Fricción, o arrastre, que actúa sobre algo que se mueve a través del aire.

**Resistencia eléctrica.** Oposición de un objeto al flujo de carga eléctrica a través de él; se mide en ohms ($\Omega$).

**Resistor.** Dispositivo de un circuito diseñado para resistir el flujo de carga.

**Resolución.** (a) Método de separación de un vector en sus partes componentes. (b) Capacidad de un sistema óptico para definir con claridad o separar los componentes de un objeto visto.

**Resonancia.** Fenómeno que ocurre cuando la frecuencia de las vibraciones forzadas sobre un objeto coincide con la frecuencia natural del objeto, lo que produce un aumento sorprendente de la amplitud.

**Resultante.** Resultado neto de una combinación de dos o más vectores.

**Retina.** Capa de tejido sensible a la luz en la parte posterior del ojo, compuesto de pequeñas células sensibles a la luz llamadas bastones y conos. Los conos son sensibles a diferentes rangos del espectro visible, lo que permite la sensación de colores. Los bastones no discriminan colores, sino que perciben la luz tenue.

**Reverberación.** Persistencia de un sonido, como en un eco, debida a reflexiones múltiples.

**Revolución.** Movimiento de un objeto que da vueltas alrededor de un eje que yace fuera del objeto.

**Rotación.** Movimiento de giro que ocurre cuando un objeto rota en torno a un eje ubicado dentro del objeto (por lo general un eje que atraviesa su centro de masa).

**rpm.** Abreviatura de rotaciones o revoluciones por minuto.

**Ruido.** En términos científicos, sonido asociado a vibraciones irregulares.

**s.** Abreviatura de segundo.

**Satélite.** Proyectil o cuerpo celeste más pequeño que orbita un cuerpo celeste más grande.

**Saturada.** Término aplicado a una sustancia, como el aire, que contiene la cantidad máxima de otra sustancia, como vapor de agua, a una temperatura y presión determinadas.

**Segundo (s).** Unidad de tiempo estándar del SI.

**Semiconductor.** Dispositivo fabricado con material no sólo con propiedades que caen entre las de un conductor y las de un aislante, sino también con resistencia que cambia de manera abrupta cuando cambian otras condiciones, como temperatura, voltaje y campo eléctrico o magnético.

**Señal analógica.** Señal basada en una variable continua, en oposición a una señal digital constituida de cantidades discretas.

**Señal digital.** Señal constituida con cantidades o señales discretas, en oposición a una señal analógica, que se basa en una señal continua.

**SI.** Abreviatura de *Système International*, un sistema internacional de unidades de medida métrica aceptado y usado por los científicos de todo el mundo. Véase el Apéndice A para más detalles.

**Simultaneidad.** Que ocurre al mismo tiempo. En relatividad especial, dos eventos que son simultáneos en un marco de referencia no necesitan ser simultáneos en un marco que se mueve con respecto al primer marco.

**Sobretono.** Término musical para el caso en el que el primer sobretono es el segundo armónico. Véase también *tono parcial*.

**Solidificar.** Volverse sólido, como en la congelación o el fraguado del concreto.

**Sólido.** Fase de la materia caracterizada por un volumen y una forma definidos.

**Sombra.** Región sombreada que aparece donde los rayos de luz son bloqueados por un objeto.

**Sonido.** Fenómeno de onda longitudinal que consiste en compresiones y rarefacciones sucesivas del medio a través del cual viaja la onda.

**Sonoridad.** Sensación fisiológica directamente relacionada con la intensidad o el volumen del sonido. La sonoridad relativa, o nivel de sonido, se mide en decibeles.

**Sublimación.** Conversión directa de una sustancia de la fase sólida a la de vapor sin pasar por la fase líquida.

**Superconductor.** Material que es un conductor perfecto, con cero resistencia al flujo de carga eléctrica.

**Supersónico.** Que viaja más rápido que la rapidez del sonido.

**Sustentación.** En las aplicaciones del principio de Bernoulli, la fuerza ascendente neta producida por la diferencia entre las presiones ascendente y descendente. Cuando la sustentación es igual al peso, es posible el vuelo horizontal.

**Tabla periódica.** Cuadro que menciona los elementos por número atómico y por arreglo electrónico, de modo que los elementos con propiedades químicas similares están en la misma columna (grupo). Véase Figura 11.9, página 216.

**Tangente.** Línea que toca una curva sólo en un lugar y es paralela a la curva en dicho punto.

**Taquión.** Partícula hipotética que puede viajar más rápido que la luz y por ende moverse hacia atrás en el tiempo.

**Tasa.** Qué tan rápido ocurre algo o cuánto cambia algo por unidad de tiempo; un cambio en una cantidad dividido entre el tiempo que tarda en ocurrir el cambio.

**Tau.** La partícula elemental más pesada de la clase de partículas elementales llamadas leptones.

**Tecnología.** El método y los medios de resolver problemas prácticos mediante la aplicación de los hallazgos de la ciencia.

**Telescopio.** Instrumento óptico que forma imágenes de objetos muy distantes.

**Temperatura.** Medida de la energía cinética traslacional promedio por molécula de una sustancia; se mide en grados Celsius o Fahrenheit o en kelvins.

**Tensión superficial.** Tendencia de la superficie de un líquido a contraerse en área y, por tanto, se comporta como una membrana elástica estirada.

**Teorema trabajo-energía.** El trabajo realizado sobre un objeto es igual a la energía cinética ganada por el objeto.

$$\text{Trabajo} = \Delta EC$$

**Teoría.** Síntesis de un gran cuerpo de información que abarca hipótesis bien comprobadas y verificadas sobre aspectos del mundo natural.

**Teoría cuántica.** Teoría que describe el micromundo, donde muchas cantidades son granulares (en unidades llamadas cuantos), en lugar de continuas, y donde las partículas de luz (fotones) y las partículas de materia (como los electrones) muestran propiedades ondulatorias así como corpusculares.

**Teoría de la relatividad especial.** Teoría abarcadora de espacio y tiempo que sustituye la mecánica newtoniana cuando las velocidades son muy grandes; la introdujo Albert Einstein en 1905. Véase también *postulados de la relatividad especial*.

**Teoría de la relatividad general.** Generalización de Einstein de la relatividad especial, que aborda el movimiento acelerado y presenta una teoría geométrica de la gravitación.

**Termodinámica.** Estudio del calor y su transformación en energía mecánica, caracterizada por dos leyes principales:
*Primera ley:* Un replanteamiento de la ley de conservación de la energía para su aplicación a sistemas que involucran cambios de temperatura: siempre que se agrega calor a un sistema, lo transforma en una cantidad igual de alguna otra forma de energía.
*Segunda ley:* El calor no puede transferirse de un cuerpo más frío a un cuerpo más caliente sin la realización de trabajo por un agente externo. Además, todos los sistemas tienden a desordenarse cada vez más con el tiempo.

**Termómetro.** Dispositivo usado para medir temperatura, por lo general en grados Celsius, Fahrenheit o kelvins.

**Termostato.** Tipo de válvula o interruptor que responde a cambios de temperatura y que se usa para controlar la temperatura de algo.

**Tiempo mínimo.** Véase *principio de Fermat de tiempo mínimo*.

**Tira bimetálica.** Dos tiras de diferentes metales soldadas o remachadas juntas. Puesto que las dos sustancias se expanden o contraen a diferentes tasas cuando se calientan o enfrían, la tira se dobla; se usa en termostatos.

**Tono parcial.** Uno de los muchos tonos que constituyen un sonido musical. Cada tono parcial tiene sólo una frecuencia. El parcial

más bajo de un sonido musical se llama frecuencia fundamental. Cualquier parcial cuya frecuencia sea un múltiplo de la frecuencia fundamental se llama armónico. La frecuencia fundamental también se llama primer armónico. El segundo armónico tiene el doble de frecuencia que la fundamental; el tercer armónico, tres veces la frecuencia, y así sucesivamente.

**Trabajo (*W*).** Producto de la fuerza sobre un objeto y la distancia a través de la que se mueve el objeto (cuando la fuerza es constante y el movimiento es en una línea recta en la dirección de la fuerza); se mide en joules.

$$\text{Trabajo} = \text{fuerza} \times \text{distancia}$$

**Transformador.** Dispositivo para aumentar o reducir el voltaje o transferir energía eléctrica de una bobina de alambre a otra mediante inducción electromagnética.

**Transistor.** Dispositivo utilizado en los circuitos eléctricos como interruptor o para amplificar una señal. Véase *semiconductor*.

**Translúcido.** Término aplicado a los materiales que dejan pasar luz pero la dispersan en todas direcciones.

**Transmutación.** Conversión de un núcleo atómico de un elemento en un núcleo atómico de otro elemento por una pérdida o ganancia en el número de protones debido a la emisión o absorción de partículas cargadas.

**Transparente.** Término aplicado a los materiales que permiten el paso de la luz a través de ellos en líneas rectas.

**Tritio.** Isótopo radiactivo inestable del hidrógeno cuyo átomo tiene un protón, dos neutrones y un electrón.

**Turbina.** Rueda de álabes activada con vapor, agua u otra potencia, que se usa para realizar trabajo.

**Turbogenerador.** Generador que es impulsado por una turbina.

**Ultrasónico.** Término aplicado a las frecuencias sonoras por arriba de 20,000 Hz, el límite superior normal de la audición humana.

**Ultravioleta (UV).** Ondas electromagnéticas de frecuencias superiores a las de la luz violeta.

**uma.** Abreviatura de *unidad de masa atómica*.

**Umbra.** Parte oscura de una sombra donde toda la luz es bloqueada. Véase también *penumbra*.

**Unidad de masa atómica (uma).** Unidad estándar de masa atómica; se basa en la masa del átomo de carbono común, al que arbitrariamente se le da el valor de exactamente 12. Una uma con valor de 1 es un doceavo la masa de este átomo de carbono común.

**Unidad térmica británica (BTU: *british thermal unit*).** Cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura de 1 libra de agua en 1 grado Fahrenheit.

**UV.** Abreviatura de *ultravioleta*.

**V.** (a) Cuando es *v* minúscula cursiva, símbolo de la *rapidez* o la *velocidad*. (b) Cuando es V mayúscula, abreviatura de *voltaje* y *volt*.

**Vacío.** Ausencia de materia.

**Valle.** Parte más baja de una onda; en contraste con la parte más alta, una *cresta*.

**Vaporización.** Proceso de un cambio de fase de líquido a vapor; evaporación.

**Vector.** Flecha cuya longitud representa la magnitud de una cantidad y cuya dirección representa la dirección de la cantidad.

**Velocidad.** Rapidez de un objeto y su dirección de movimiento; una cantidad vectorial.

**Velocidad de onda.** Rapidez de onda enunciada con la dirección de viaje.

**Velocidad rotacional.** Rapidez rotacional junto con una dirección para el eje de rotación o revolución.

**Velocidad tangencial.** Velocidad tangente a la trayectoria de un proyectil.

**Velocidad terminal.** Rapidez terminal junto con la dirección del movimiento (abajo para objetos que caen).

**Ventaja mecánica.** Razón de la fuerza de salida con respecto a la fuerza de entrada para una máquina.

**Vibración.** Oscilación; un movimiento repetitivo de ida y vuelta en torno a una posición de equilibrio: un "contoneo que se repite en el tiempo".

**Vibración forzada.** Vibración de un objeto causada por las vibraciones de un objeto cercano. La caja de resonancia en un instrumento musical amplifica el sonido mediante una vibración forzada.

**Vida media.** Tiempo necesario para que decaiga la mitad de los átomos en una muestra de isótopos radiactivos. Este término también sirve para describir los procesos de decaimiento en general.

**Volt (V).** Unidad del potencial eléctrico del SI. Un volt es la diferencia de potencial eléctrico a través de la cual un coulomb de carga gana o pierde 1 joule de energía. 1 V = 1 J/C.

**Voltaje.** "Presión" eléctrica o una medida de la diferencia de potencial eléctrico.

$$\text{Voltaje} = \frac{\text{energía potencial eléctrica}}{\text{unidad de carga}}$$

**Voltímetro.** Galvanómetro calibrado para leer diferencias de potencial.

**Volumen.** Cantidad de espacio que ocupa un objeto. Otra palabra para la "sonoridad" de un sonido.

**W.** (a) Abreviatura de *watt*. (b) Cuando es *W* cursiva, abreviatura de *trabajo*.

**Watt (W).** Unidad de potencia del SI. Un watt se gasta cuando 1 joule de trabajo se realiza en 1 segundo; 1 W = 1 J/s.

# Créditos

## Créditos de texto y arte

87: (Fig 5.Un4) izquierda y (Fig 5.Un5) derecha: Hewitt, Paul, *Conceptual Physics,* 6th Ed., © 1989. Reimpreso y reproducido electrónicamente con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

87: (Fig 5.Un6) derecha: Hewitt, Paul G.; Lyons, Suzanne A., Suchocki, John A.; Yeh, Jennifer, *Conceptual Integrated Science,* 2nd Ed., © 2013, p. 41. Reimpreso y reproducido electrónicamente con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

118: (Fig 7.14) Hewitt, Paul G.; Lyons, Suzanne A., Suchocki, John A.; Hewitt, Leslie A., *Conceptual Integrated Science,* 5th Ed., © 2012, p. 76. Reimpreso y reproducido electrónicamente con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

119: (Fig 7.Un3) Hewitt, Paul G.; Lyons, Suzanne A., Suchocki, John A.; Hewitt, Leslie A., *Conceptual Physical Science,* 5th Ed., © 2012, p. 77. Reimpreso y reproducido electrónicamente con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

131: (Fig 7.Un14, Fig 7.Un15, y Fig 7. Un16) Hewitt, Paul G.; Lyons, Suzanne A., Suchocki, John A.; Hewitt, Leslie A., *Conceptual Physical Science,* 5th Ed., © 2012, pp. 88, 89. Reimpreso y reproducido electrónicamente con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

201: (Fig 10.Un9) Hewitt, Paul G.; Lyons, Suzanne A., Suchocki, John A.; Hewitt, Leslie A., *Conceptual Physical Science,* 5th Ed., © 2012, p.113. Reimpreso y reproducido electrónicamente con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

257: (Fig 13.29) Suchocki, John A., *Conceptual Chemistry,* 5th Ed., © 2014, p 236. Reimpreso y reproducido electrónicamente con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

296: (Fig 15.22) Suchocki, John A., *Conceptual Chemistry,* 5th Ed., © 2014, p. 230. Reimpreso y reproducido electrónicamente con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

323: (Fig 17.5) Suchocki, John A., *Conceptual Chemistry,* 5th Ed., © 2014, p. 239. Reimpreso y reproducido electrónicamente con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

328: (Fig 17.15) Suchocki, John A., *Conceptual Chemistry,* 5th Ed., © 2014, p. 231. Reimpreso y reproducido electrónicamente con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

357: (Al intentar entender…) Hewitt, Paul G.; Suchocki, John A.; Hewitt, Leslie A., *Conceptual Physical Science,* 5th Ed., © 2012. Reimpreso y reproducido electrónicamente con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

383: (Fig 20.15) Hewitt, Paul G.; Lyons, Suzanne A., Suchocki, John A.; Yeh, Jennifer, *Conceptual Integrated Science,* 2nd Ed., © 2013, p. 185. Reimpreso y reproducido electrónicamente con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

476: (Fig 25.13) Hewitt, Paul G.; Lyons, Suzanne A., Suchocki, John A.; Hewitt, Leslie A., *Conceptual Physical Science,* 5th Ed., © 2012, p. 229. Reimpreso y reproducido electrónicamente con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

482: (Fig 25.Un2 y Fig 25.Un3) Hewitt, Paul G.; Lyons, Suzanne A., Suchocki, John A.; Hewitt, Leslie A., *Conceptual Physical Science,* 5th Ed., © 2012, p. 234. Reimpreso y reproducido electrónicamente con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

605: (Fig 32.3 y Fig 32.5) Suchocki, John A., *Conceptual Chemistry,* 4th Ed., © 2011, pp. 96, 97. Reimpreso y reproducido electrónicamente con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

## Créditos de fotografías

xx: Lillian Lee Hewitt
1: John A. Suchocki/Paul G. Hewitt
2: fotos 1–3: Gretchen Hewitt/Paul G. Hewitt
7: derecha: Peter Barritt/Alamy
7: izquierda: Simon Fishley/South African Astronomical Observatory
19: fondo: Arriba Seller/Shutterstock
19: foto: Duane Ackerman/Paul G. Hewitt
20: foto 1: Monica Davey/Paul G. Hewitt
20: foto 2: Howard Brand/Paul G. Hewitt
20: foto 3: Paul G. Hewitt
20: foto 4: Pat Hall, City College of San Francisco/Paul G. Hewitt
21: Paul G. Hewitt
22: Erich Lessing/Art Resource, NY
23: Photos.com
24: Nicola Lorusso/Alinari/Art Resource, NY
29: Pat Hall, City College of San Francisco/ Paul G. Hewitt
30: Paul G. Hewitt
39: fotos 1–2: Paul G. Hewitt
39: foto 3: Fredrik Jensen/Paul G. Hewitt
39: foto 4: Chelsie Liu/Paul G. Hewitt
40: Mediacolor's/Alamy
41: PeterAustin/iStockphoto
50: Andrew D. Bernstein/NBAE/Getty Images
57: fotos 1–2: Paul G. Hewitt
57: foto 3: Ocean/Corbis
57: foto 4: Paul G. Hewitt
58: Georgios Kollidas/Fotolia
60: Addison Wesley Longman, Inc./Pearson
63: MiloVad/Shutterstock
67: George Resch/Fundamental Photographs
74: foto 1: Exploratorium
74: foto 2: Russ Kinne/Jupiter Images
74: foto 3: Toby Jacobson/Paul G. Hewitt
74: foto 4: Paul G. Hewitt
75: izquierda: Paul G. Hewitt
75: derecha: Paul G. Hewitt
81: arriba: John A. Suchocki/ Paul G. Hewitt
81: abajo: Lillian Lee Hewitt/ Paul G. Hewitt
85: Jerry Lin/Shutterstock
87: Paul G. Hewitt
90: fotos 1–4: Paul G. Hewitt
91: Paul G. Hewitt
92: Rafael Ramirez/Fotolia

93: Sinibomb Images/Alamy
94: Oliver Furrer/Alamy
95: Paul G. Hewitt
96: Paul G. Hewitt
100: Paul G. Hewitt
102: izquierda: PSSC Physics ©1965, Education Development Center, Inc.; D.C. Heath & Company
102: derecha: PSSC Physics ©1965, Education Development Center, Inc.; D.C. Heath & Company
106: izquierda: Paul G. Hewitt
106: derecha: Paul G. Hewitt
109: foto 1: Majken Korsager/ Paul G. Hewitt
109: fotos 2–4: Paul G. Hewitt
110: A. Danvers/RMN-Grand Palais/ Art Resource, NY
111: Liu Dawei Xinhua News Agency/ Newscom
112: NASA Images
115: arriba: Paul G. Hewitt
115: abajo: Paul G. Hewitt
116: izquierda: Michael Vollmer/ Paul G. Hewitt
116: derecha: Michael Vollmer/ Paul G. Hewitt
118: Frank Naylor/Alamy
121: Pat Hall, City College of San Francisco/Paul G. Hewitt
123: Angela Lewis/Chattanooga Times Free Press/AP Images
124: Paul G. Hewitt
125: Clynt Garnham/Alamy
127: Pat Hall, City College of San Francisco/Paul G. Hewitt
131: Paul G. Hewitt
132: fotos 1–2: Paul G. Hewitt
132: foto 3: Anna Marie Darden/Paul G. Hewitt
132: fotos 4–5: Pat Hall, City College of San Francisco/Paul G. Hewitt
133: Paul G. Hewitt
136: Paul G. Hewitt
137: Purple Collar Pet Photography/Flickr/ Getty images
138: Peter Nelson/Paul G. Hewitt
141: Richard Megna/Fundamental Photographs
142: Steven Kingsman/Alamy
143: Paul G. Hewitt
144: Paul G. Hewitt
146: Paul G. Hewitt
150: Paul G. Hewitt
152: Evolve/Fotoshot/ZUMAPRESS/ Newscom
154: Paul G. Hewitt
158: Lillian Lee Hewitt/Paul G. Hewitt
159: Pat Hall, City College of San Francisco/Paul G. Hewitt
160: foto 1: Daday van den Berg/ Paul G. Hewitt
160: foto 2: NASA
160: fotos 3–4: Paul G. Hewitt
161: Paul G. Hewitt
167: izquierda: NASA Johnson Space Center
167: derecha: NASA
182: foto 1: Bob Abrams/Paul G. Hewitt
182: fotos 2–3: Enrique Baez, JPL/Paul G. Hewitt
182: foto 4: Pat Hall, City College of San Francisco/Paul G. Hewitt
183: Paul G. Hewitt
185: arriba: Richard Megna/Fundamental Photographs
185: abajo: Paul G. Hewitt
187: Paul G. Hewitt
188: AP Foto/Al Behrman
190: Andrew D. Bernstein/NBAE/Getty Images
191: NASA/Johnson Space Center
194: arriba: Paul G. Hewitt
194: abajo: Diane Schiumo/Fundamental Photographs
195: NASA/Goddard Space Flight Center
196: arriba: Edinburgh/Royal Observatory/ Science Source
196: abajo: Erich Lessing/Art Resource, NY
200: arriba: NASA/Goddard Space Flight Center
200: abajo: NASA Earth Observing System
203: axz65/Fotolia
207: fondo: Arriba Seller/Shutterstock
207: foto: Mei Tuck Hu/Paul G. Hewitt
208: foto 1: European Communities, 1995-2006
208: foto 2: Paul G. Hewitt
208: foto 3: Mopic/Fotolia
208: foto 4: Darlene Tucker/Paul G. Hewitt
209: Bettmann/Corbis
212: izquierda: The Enrico Fermi Institute
212: derecha: Cortesía de IBM Archives. No se permite el uso no autorizado.
215: Paul G. Hewitt
219: Getty Images
226: foto 1: PASIEKA/Science Photo Library/Alamy
226: fotos 2–4: Paul G. Hewitt
227: Paul G. Hewitt
228: arriba: KdEdesign/Shutterstock
228: abajo: Dee Breger/Science Source
230: Paul G. Hewitt
231: Andrew Davidhazy
233: Lillian Lee Hewitt/Paul G. Hewitt
234: izquierda: Georgescu Gabriel/ Shutterstock
234: derecha: Paul G. Hewitt
234: abajo: Paul G. Hewitt
235: arriba: Gary Blakeley/Fotolia
235: abajo: Lillian Lee Hewitt/Paul G. Hewitt
237: Paul G. Hewitt
238: Irv Beckman/Dorling Kindersley, Inc.
239: Adam Seward RF/Alamy
243: Paul G. Hewitt
244: fotos 1–2: Paul G. Hewitt
244: foto 3: Alan Spencer Fotography/ Alamy
244: foto 4: Mark Serway/Paul G. Hewitt
245: Georgios Kollidas/Fotolia
246: arriba: Paul G. Hewitt
246: recuadro: Paul G. Hewitt
247: Corbis Premium RF/Alamy
248: Tim Moore/Alamy
253: izquierda: Dual Aspect Scotland Collection/Alamy
253: derecha: Alamy
256: Dmitry Kalinovsky/Shutterstock
257: arriba: Paul G. Hewitt
257: abajo: Andrei Kuzmik/Shutterstock
258: Paul G. Hewitt
263: arriba: Paul G. Hewitt
263: abajo: Bruce Novak/Paul G. Hewitt
264: foto 1: Jens Ekberg/Paul G. Hewitt
264: foto 2: bosquejo de Gaspar Schott del experimento de los hemisferios de Magdeburgo de Otto von Guericke.
264: foto 3: Jim Culleton/Paul G. Hewitt
264: foto 4: Aage Mellon/Paul G. Hewitt
265: Anette Zetterberg/Paul G. Hewitt
267: Paul G. Hewitt
269: Paul G. Hewitt
276: arriba: Olegusk/Shutterstock
276: abajo: David Hewitt/Paul G. Hewitt
283: fondo: Arriba Seller/Shutterstock
283: foto: Paul G. Hewitt
284: foto 1: Rainer Albiez/ Shutterstock
284: fotos 2–4: Paul G. Hewitt
284: foto 5: Nuridsany et Perennou/ Science Source
285: Barney Burstein/Fine Art/Corbis
292: arriba: Lu Engineers, Penfield, NY
292: medio: Hu Meidor/Paul G. Hewitt
292: abajo: AP Images
293: David A. Vasquez/Paul G. Hewitt
296: Sportlibrary/Shutterstock
298: Paul G. Hewitt
302: fotos 1–3: Paul G. Hewitt
303: Paul G. Hewitt
304: Incamerastock/Alamy
305: Paul G. Hewitt
306: arriba: Paul G. Hewitt
306: abajo: Nancy Roger/Paul G. Hewitt
309: arriba: David J. Green/Alamy
309: abajo: Tai McNelis/Paul G. Hewitt
310: Paul G. Hewitt
311: arriba: Epcot Images/Alamy
311: abajo: Paul G. Hewitt
315: izquierda: mtsyri/Shutterstock
315: derecha: Lillian Lee Hewitt/Paul G. Hewitt

320: fotos 1–2: Paul G. Hewitt
320: foto 3: Copyright The Exploratorium, www.exploratorium.edu. Fotografía de Nicole Minor
320: foto 4: Tammy Tunison/Paul G. Hewitt
321: Paul G. Hewitt
322: arriba: Paul G. Hewitt
322: medio: Lillian Lee Hewitt
322: abajo: Lillian Lee Hewitt/Paul G. Hewitt
323: Paul G. Hewitt
331: arriba: Paul G. Hewitt
331: abajo: Keith Srakocic/AP Images
336: fotos 1–3: Paul G. Hewitt
336: foto 4: Rune Myhre/Paul G. Hewitt
337: Chris Hellier/Alamy
340: Paul G. Hewitt
342: Mark Duffy/Alamy
346: Dennis Wong/Paul G. Hewitt
347: Michael Howell/Robert Harding World Imagery
349: Paul G. Hewitt
355: fondo: Arriba Seller/Shutterstock
355: foto: Jojo Dijamco/Paul G. Hewitt
356: fotos 1–5: Paul G. Hewitt
357: Copyright The Exploratorium, www.exploratorium.edu. Fotografía de Nancy Rodger
360: Brenda Tharp/Jupiter Images
363: Fundamental Photographs
365: Eliot Elisofon/Time Life Pictures/Getty Images
367: U.S. Navy News Foto
368: Ted Kinsman/Science Source
374: fotos 1–2: Paul G. Hewitt
374: foto 3: Carl Angell/Paul G. Hewitt
374: foto 4: Duane Ackerman/Paul G. Hewitt
375: Paul G. Hewitt
377: Paul G. Hewitt
380: izquierda: Paul G. Hewitt
380: derecha: Lebrecht Music and Arts Photo Library/Alamy
381: arriba: UHB Trust/Stone/Getty Images
381: abajo: Crisod/Fotolia
383: arriba: Paul G. Hewitt
383: abajo izquierda: Associated Press/AP Images
383: abajo derecha: Paul G. Hewitt
386: Addison Wesley Longman, Inc./Pearson
391: fotos 1–2: Paul G. Hewitt
391: foto 3: Jojo Dijamco/Paul G. Hewitt
391: foto 4: Dean Baird/Paul G. Hewitt
392: arriba: Sheila Terry/Science Source
392: abajo: Bizuayehu Tesfaye/Invision/AP Images
393: arriba: ZUMA Press, Inc./Alamy
393: abajo: ZUMA Press, Inc./Alamy
394: Paul G. Hewitt
395: Beth A. Keiser/AP Images
396: arriba: Kevin Winter/Getty Images
396: abajo: Tyler Johnson/Paul G. Hewitt
397: arriba: Matt Sayles/AP Images
397: abajo: Ronald B. Fitzgerald
398: David Corio/Redferns/Getty Images
399: arriba: Hu Meidor/Paul G. Hewitt
399: abajo: Andrew Syred/Science Source
403: Paul G. Hewitt
405: fondo: Arriba Seller/Shutterstock
405: foto: Bob Abrams/Paul G. Hewitt
406: foto 1: Paul G. Hewitt
406: foto 2: Photowings/Fotolia
406: fotos 3–4: Kobus Nel/Paul G. Hewitt
407: Tomas Abad/Alamy
412: Little Tomato Studio/Fotolia
413: arriba: Will Maynez/Paul G. Hewitt
413: abajo: Timothy Hodgkinson/Shutterstock
415: Paul G. Hewitt
420: Westinghouse/AP images
423: medio: Eid Ahmed/Paul G. Hewitt
423: abajo: Dorling Kindersley, Inc.
424: Paul G. Hewitt
430: foto 1: David Housden/Paul G. Hewitt
430: foto 2: Sara Puno/Paul G. Hewitt
430: fotos 3–4: Pat Hall, City College of San Francisco/Paul G. Hewitt
431: Pictorial Press/Alamy
432: Addison Wesley Longman, Inc./Pearson
433: Billy Hustace/Corbis
435: Tim Ridley/Dorling Kindersley, Inc.
437: Tim Ridley/Dorling Kindersley, Inc.
441: izquierda: Paul G. Hewitt
441: derecha: Evan Jones/Paul G. Hewitt
442: Addison Wesley Longman, Inc./Pearson
444: Addison Wesley Longman, Inc./Pearson
445: Paul G. Hewitt
452: foto 1: Fred Myers
452: foto 2: Paul G. Hewitt
452: foto 3: Pat Hall, City College of San Francisco/Paul G. Hewitt
452: foto 4: Alan Davis/Paul G. Hewitt
453: Everett Collection/Newscom
455: Richard Megna/Fundamental Photographs
456: Richard Megna/Fundamental Photographs
457: Duane Ackerman/Paul G. Hewitt
459: medio: Richard Megna/Fundamental Photographs
459: abajo: STR/AP images
460: John Suchocki/Paul G. Hewitt
461: Addison Wesley Longman, Inc./Pearson
464: Jamenpercy/Fotolia
465: arriba: Martin Oeggerli/Science Source
465: abajo: Guy Croft SciTech/Alamy
469: fotos 1–2: Lillian Lee Hewitt/Paul G. Hewitt
469: foto 3: Kobus Nel/Paul G. Hewitt
469: foto 4: Paul G. Hewitt
470: Georgios Kollidas/Fotolia
472: John A. Suchocki/Paul G. Hewitt
476: Will Maynez/Paul G. Hewitt
485: fondo: Arriba Seller/Shutterstock
485: foto: Victor Lee/Paul G. Hewitt
486: foto 1: CNES French Space Agency
486: foto 2: Paul G. Hewitt
486: fotos 3–4: Dean Baird/Paul G. Hewitt
486: foto 5: Paul Doherty/Paul G. Hewitt
487: Clive Streeter/Dorling Kindersley, Inc.
489: arriba: Linda Novak/Paul G. Hewitt
489: abajo: Bruce Novak/Paul G. Hewitt
490: Paul G. Hewitt
492: Paul G. Hewitt
493: Paul G. Hewitt
494: arriba: Diane Schiumo/Fundamental Photographs
494: abajo: Diane Schiumo/Fundamental Photographs
496: Ralph C. Eagle/Science Source
498: Addison Wesley Longman, Inc./Pearson
504: foto 1: Eric Muller/Paul G. Hewitt
504: foto 2: vario images GmbH & Co.KG/Alamy
504: fotos 3–4: Peter Lang/Paul G. Hewitt
504: foto 5: Joy Wetherhold/Paul G. Hewitt
505: North Wind Picture Archives/Alamy
506: medio: Cordelia Molloy/Science Source
506: abajo: Hu Meidor/Paul G. Hewitt
509: Dave Vasquez/Paul G. Hewitt
510: medio: Paul G. Hewitt
510: abajo: Dave Vasquez/Paul G. Hewitt
511: Paul G. Hewitt
512: arriba: Hu Meidor/Paul G. Hewitt
512: abajo: Mark Rutledge/Fotolia
513: medio: Kushch Dmitry/Shutterstock
513: abajo: Paul G. Hewitt
514: UgputuLf SS/Shutterstock
515: medio: Shannon Stent/E+/Getty Images
515: Abajo: Stephen Mcsweeny/Shutterstock
519: foto 1: Paul G. Hewitt
519: foto 2: Barbara Thomas/Paul G. Hewitt
519: foto 3: Fred Myers
519: foto 4: Cathy Barthelemy/Paul G. Hewitt

520: Bridgeman-Giraudon/Art Resource, NY
522: Paul G. Hewitt
524: arriba: Bill Bachman/Alamy
524: medio: Institute of Paper Science & Technology
526: Ted Mathieu/Paul G. Hewitt
527: Robert Greenler/Paul G. Hewitt
531: Paul G. Hewitt
533: Sigurd/Fotolia
534: iStockphoto/Thinkstock
536: Paul G. Hewitt
537: Duane Ackerman/Paul G. Hewitt
541: Paul G. Hewitt
542: arriba: Milo Patterson/Paul G. Hewitt
542: abajo: Paul G. Hewitt
543: alexandro900/Fotolia
544: foto 1: Robert Greenler/Paul G. Hewitt
544: foto 2: Paul G. Hewitt
544: foto 3: Udo Von Mulert/Paul G. Hewitt
544: foto 4: Janie Head/Paul G. Hewitt
545: arriba: Paul G. Hewitt
545: abajo: Dudarev Mikhail/Shutterstock
546: PSSC Physics ©1965, Education Development Center, Inc.; D.C. Heath & Company
547: Ken Kay/Fundamental Photographs
549: medio: Paul G. Hewitt
549: abajo: PSSC Physics ©1965, Education Development Center, Inc.; D.C. Heath & Company
551: Fred Myers
553: GIPhotostock / Science Source
554: Paul G. Hewitt
556: Paul G. Hewitt
557: Diane Schiumo Hirsch/Fundamental Photographs
562: foto 1: Paul G. Hewitt
562: foto 2: Neil deGrasse Tyson/Paul G. Hewitt
562: fotos 3–4: Pat Hall, City College of San Francisco/Paul G. Hewitt
562: foto 5: Per Olaf Zetterberg/Paul G. Hewitt
563: arriba izquierda: David Farrell/Getty Images
563: abajo izquierda: Hulton Archive/Getty Images
563: derecha: Neil deGrasse Tyson/Paul G. Hewitt
567: foto a: GIPhotostock/Science Source
567: fotos b–d: Department of Physics, Imperial College London/Science Source
571: arriba: Aaron Haupt/Science Source
571: abajo: Mark A. Schneider/Science Source
573: arriba: Lillian Lee Hewitt
573: abajo: Paul G. Hewitt
577: Richard Megna/Fundamental Photographs
582: foto 1: Neil Chapman/Paul G. Hewitt
582: foto 2: CERN/European Organization for Nuclear Research
582: foto 3: Anne Cox/Paul G. Hewitt
582: foto 4: David Smith/Paul G. Hewitt
583: SSPL/Getty Images
588: Amy Snyder, Exploratorium/Paul G. Hewitt
589: arriba: Albert Rose/Paul G. Hewitt
589: abajo: Paul G. Hewitt
590: arriba: Paul G. Hewitt
590: abajo: Meggers Gallery/AIP/Science Source
591: arriba: GIPhotostock/Science Source
591: medio: Will & Deni McIntyre/Science Source
591: abajo: P. G. Merli, G. F. Missiroli, y G. Pozzi. "On the Statistical Aspect of Electron Interference Phenomena," *American Journal of Physics*, Vol. 44, No 3, marzo 1976. Copyright © 1976 de the American Association of Physics Teachers
592: arriba: Dr. Tony Brain/Science Source
593: Segre Collection/AIP/Science Source
595: Bain Collection, Prints & Photographs Division, Library of Congress, LC-DIG-ggbain-35303
596: izquierda: InFocus/Alamy
596: derecha: National Oceanic and Atmospheric Administration
601: fondo: Top Seller/Shutterstock
601: foto: Alan Davis/Paul G. Hewitt
602: fotos 1–2: Paul G. Hewitt
602: foto 3: Dean Zollman/Paul G. Hewitt
602: foto 4: Art Hobson/Paul G. Hewitt
603: arriba: TopFoto/The Image Works
603: abajo: Library of Congress Prints and Photographs Division Washington[LC-DIG-ggbain-36570]
610: Bettmann/Corbis
615: foto 1: Stanley Micklavzina/Paul G. Hewitt
615: foto 2: Minemero/Fotolia
615: foto 3: Roger Rassool/Paul G. Hewitt
615: foto 4: Pat Hall, City College of San Francisco/Paul G. Hewitt
616: Underwood & Underwood/Corbis
617: National Library of Medicine
618: Richard Megna/Fundamental Photographs
619: Charles D. Winters/Science Source
620: iStockphoto/Thinkstock
621: Jerry Nulk y Sra Joshua Baker/Paul G. Hewitt
622: Chris Priest/Science Source
626: izquierda: Wellfoto/Fotolia
626: derecha: Roger Rassool/Paul G. Hewitt
627: arriba: Lillian Lee Hewitt/Paul G. Hewitt
627: medio: Ernest Orlando
627: abajo: Richard Wareham Fotografie/Alamy
637: foto 1: Science Source
637: foto 2: SPL/Science Source
637: foto 3: AKG/Science Source
637: foto 4: Science Source
637: foto 5: World History Archive/Alamy
641: Corbis
642: Argonne National Laboratory
645: Comstock Images
649: Lillian Lee Hewitt/Paul G. Hewitt
657: fondo: Arriba Seller/Shutterstock
657: foto: Paul G. Hewitt
658: foto 1: Paul G. Hewitt
658: foto 2: AP Images
658: foto 3: Paul G. Hewitt
674: Mark Paternostro/John F. Kennedy Space Center/NASA
677: Science Source
678: Gilles Paire/Fotolia
686: foto 1: Paul G. Hewitt
686: foto 2: Lillian Lee Hewitt
686: foto 3: NASA Images
686: foto 4: Paul G. Hewitt
687: Library of Congress Prints and Photographers Division
705: Paul G. Hewitt

# Índice


## A

Aberración, 537
Aberración cromática, 537
Aberración esférica, 537
Aceleración, 43-46
  caída libre y, 46-50, 64-65
  caída no libre y, 65-67
  centrífuga, 149
  centrípeta, 134
  de la Tierra, 79
  definición de, 43
  fricción y, 59-61
  fuerza neta y, 58-59, 63-64
  fuerza y, 58-59
  gravedad y, 46-47, 64-65
  impulso y, 92-95
  inercia y, 58, 64-65
  ley de, 58, 63-64, 85
  masa y, 61-63, 65, 79-81
  peso y, 61-63
  principio de equivalencia y, 689
  resistencia del aire y, 64-67
  sobre planos inclinados, 23-25, 45-46
  tangencial, 134
  velocidad y, 43-46, 50
Aceleración centrífuga, 149
Aceleración centrípeta, 134
Aceleración tangencial, 134
Actitud científica, 8-12
Acústica, 380
Adams, J. C., 175
Adhesión, 258
Adición
  de vectores, 28-29
  de velocidades, 673-675
ADN, daño inducido por radiación de, 621
Agua. *Véase también* Líquido(s)
  capacidad calorífica específica de, 290-291
  color de, 514-515
  congelamiento de, 294-296, 327-328
  expansión de, 293-295
  pesada, 642
  transparencia de, 514-515
Agua pesada, 642
Agujeros de gusano, 174
Agujeros negros, 174-175
Aire
  compresión del, 265
  convección en, 304-306
  densidad del, 266-267
    ley de Boyle y, 270-271
  flotabilidad del, 271-272
  líneas de corriente en, 274-275
  peso del, 266-267
  propiedades aislantes del, 304
  saturado, 324
  sonido en
    rapidez de, 378-379
    transmisión del, 376-378
Aislantes, 303-304, 310, 412
Alas, flujo de aire alrededor, 274
Alimentos, irradiación de, 618, 632
Altímetros, 269
Altura, 376, 393
Alumbrado público, excitación y, 565
AM, señales de radio, 386, 548
Ampere, 432
Ampere, Andre Marie, 453
Amperímetro, 461
Amplitud, de onda, 359
Análisis de Fourier, 392, 397-399
Análisis de movimiento, 49
Anderson, Carl, 680
Ángulo crítico, 531-533
Ángulo de ataque, 274-275
Anillos de Newton, 553, 584
Animal, tamaño frente a fuerza de, 237-239
Antenas, fractal, 490
Antenas fractales, 490
Antigua Grecia, ciencia en, 3-6
Antimateria, 221-222
Antinodos, de ondas estacionarias, 364
Antipartículas, 680
Apogeo, 198
Arcoíris, 529-530
Área superficial, escalamiento y, 236-239
Área, superficie, escalamiento y, 236-239
Aristarco, 4-7
Aristóteles, 9, 23, 209
  teoría del movimiento, 21-22, 23, 25, 34
Armaduras, 462, 474-475
Armónico, 395
Arquímedes, 120
Arte, ciencia y, 12
Astigmatismo, 537
Astronautas. *Véase* Viaje espacial
Atardeceres
  color de, 512-513
  refracción y, 525-526
Aterrizado, 414, 436
Aterrizado, enchufe eléctrico, 436
Atmósfera, 265. *Véase también* Aire
  cambio climático y, 313-314
  capas de, 265-266
  condensación en, 324-325
  densidad del gas en, 265-266, 272
  dimensiones de, 265-266
  efecto invernadero y, 312-313
  mareas en, 170
  transparencia de, 493
Átomo(s), 209-218, 408-410
  características de, 210-211
  cargado, 215-217, 410
  electrones en, 213, 408-410
  estructura de, 213-214
  excitación de, 564-566, 567
  frente a elementos, 214
  imágenes de, 212-213
  modelo (planetario) de Bohr, 213, 215, 607-608
  movimiento browniano y, 210
  movimiento de, 209, 210, 211
    temperatura y, 286-287
  neutrones en, 213-214, 218, 408-410
  protones en, 213-214, 218, 408-410
  tamaño de, 210
    relativo, 215-217
Aurora austral, 276, 464, 565
Aurora boreal, 464, 565
Autoinducción, 478
Aviones
  estampido sónico de, 367-368
  flujo de aire alrededor de las alas, 274
  supersónicos, 367

## B

Bacon, Francis, 8
Bacterias, magnetismo en, 465
Baird, Dean, 321
Balanceo de balde con agua, 146
Balmer, Johann, Jakob, 606-607
Barómetro aneroide, 269
Barómetros, 268-269
Barrera del sonido, 367, 368
Bastones, retina, 496-497
Baterías, 432
  capacitores y, 423
Batimientos, 385-387
Becquerel, Henri, 616, 617
Bell, Alexander Graham, 394
Bels, 394
*Big Bang*, rayos cósmicos de, 464
Bioluminiscencia, 572
Biomagnetismo, 465
Blindaje eléctrico, 419-420
Blomberg, Sara, 265
Bocinas, 378
Bohr, Aage, 603
Bohr, Harald, 603
Bohr, Niels, 595-596, 603, 638
  modelo atómico, 213, 215, 607-608
  principio de correspondencia, 611
Bombas
  atómicas (fisión), 640-641, 651
  de hidrógeno (fusión), 220, 228
Bombas atómicas, 640-641, 651
Bombas de fisión nuclear, 640-641, 651
Bombas de hidrógeno, 651
Bombas de vacío, 269
Bombas térmicas, 328-329
Bosón de Higgs, 612
Botes
  flotación de, 253-254
  ondas de proa de, 367
Bragg, William Henry, 228
Bragg, William Lawrence, 228
Brahe, Ticho, 196
Brand, Howie, 96
Brazo de palanca, momento de torsión y, 139
Bronowski, Jacob, 563
Brown, Robert, 210

## C

Caída libre, 46-50, 64-65
Calentamiento. *Véase también* Transferencia de calor
  a partir de condensación, 323
  adiabático, 341-343
Calentamiento global, 313-314
Calidad, de sonido, 395
Calor, 287-295
  definición de, 287
  específico, 289-291
  expansión térmica y, 291-296
  latente
    de fusión, 330
    de vaporización, 330-331
  medición de, 289
  procesos adiabáticos y, 341-343
  unidades de, 289
Calor latente
  de fusión, 330
  de vaporización, 330-331
Caloría (energía de alimento), 289
Caloría (energía térmica), 289
Calórico, 339
Cámara de burbujas, 627
Cámara de chispas, 627
Cámara de serpentina, 627
Cámaras
  estenopeica, 535
  lentes de, 535
Cámaras de niebla, 626-627, 630
Cámaras estenopeicas, 535
Cambio climático, 313-314
Caminar sobre fuego, 303-304, 331
Campo gravitacional, 170-173, 417
  de Tierra, 170-173
  del Sol, 173
  dentro de planeta, 171-173
Campos de fuerza, 171, 417
  eléctrico, 417-421
  gravitacional, 170-173, 417
  magnético, 171, 455-456, 462-464, 470-472, 475-478. *Véase también* Campo magnético
Campos eléctricos, 417-421, 606
  blindaje de, 419-420
  campos magnéticos y, 455-456
  flujo de corriente y, 438-440
Campos magnéticos, 171, 455-456
  corriente eléctrica y, 455-456
  de Tierra, 462-464
  del Sol, 463

en inducción electromagnética, 470-472
en transformadores, 475-478
Cantidad de movimiento, 90-108
angular, 150-152
conservación de, 151-152
aumento, 93
como cantidad vectorial, 97
conservación de, 97-103, 151-152
ecuación relativista para, 681
en colisiones, 99-103
impulso y, 92-95
lineal, 150
rebote y, 96
reducción, 94-95
relativista, 677-678
Cantidad de movimiento angular, 150-152
conservación de, 151-152
frente a cantidad de movimiento lineal, 150
Cantidad de movimiento lineal, 150
Cantidad de movimiento relativista, 677-678
Cantidad escalar, 28, 43, 51
Cantidad vectorial, 28, 43, 51
Capa de electrones, 213, 409
Capa neutra, 232-233
Capacidad calorífica, 289-291
del agua, 290-291
Capacidad calorífica específica, 289-291
del agua, 290-291
Capacitores, 423, 437-438
Capilaridad, 258
Carbón, radiación proveniente de, 619
Carga, 408-410
conservación de, 409-410
cuantizada, 410
efecto ámbar y, 604
estática, 410
flujo de, 431-432. *Véase también* Corriente eléctrica
unidad de, 411
Carga eléctrica. *Véase* Carga
Carga estática, 410. *Véase también* electrostática
de generador Van de Graaff, 424
Cargar
por contacto, 413-414
por inducción, 414-415
*Cataglyphis*, adaptación al calor, 295
Catalizador de aprendizaje, 161
Catenarias, 234-235
Cavendish, Henry, 163
CD, grabación de, 399-400
Celdas de combustible, 124, 442
Celdas de combustible de hidrógeno, 442
Celdas fotovoltaicas, 124-315
Celsius, Anders, 286
Centrífugas, 146
Centro de masa/gravedad, 140-145
definición de
estabilidad y, 143
ubicación, 141-142
Cero absoluto, 286, 337-339
CFL (lámparas fluorescentes compactas), 441
Chinook, 342
Chispa, a partir de carga estática, 410
Choque eléctrico, 435-436, 439
Cielo, color de, 511-512
Ciencia
arte y, 12
basura, 125
definición de, 4
en antigua Grecia, 3-6
física como fundamento de, 15-16
frente a pseudociencia, 13
historia de, 4, 5
marco temporal de, 16-17
matemáticas y, 8
religión y, 12-14
tecnología y, 14-15
Ciencia basura, 125
Cinturón de radiación Van Allen, 464
Circuito. *Véase* Circuitos eléctricos
Circuito en serie, 441, 442-443
Circuitos eléctricos, 441-445
en paralelo, 443-445
en serie, 441, 442-443
fusibles para, 445
sobrecarga en, 445
Circuitos en paralelo, 443-444
sobrecarga en, 445
Clima
procesos adiabáticos y, 341
termodinámica y, 341-343
Código de Producto Universal (UPC), 577
Cohen, Nathan, 490
Cohesión, 258
Colisiones
cantidad de movimiento en, 99-103
elásticas, 99
inelásticas, 99
Colisiones elásticas, 99
Colisiones inelásticas, 99
Color(es), 504-518
complementario, 509
de arcoíris, 529-530
de atardeceres, 512-513
de nubes, 514
de sombras, 509
del agua, 514-515
del cielo, 511-512
dispersión y, 511, 515, 529-530
excitación y, 565
frecuencia de luz y, 505
interferencia de, 553-554
iridiscencia y, 553-554
mezclas de, 507, 509-511, 513
primario, 508
aditivo, 508
sustractivo, 510
reflexión selectiva y, 505-506
transmisión selectiva y, 507
Colores complementarios, 509
Colores de interferencia, 553-554
Colores primarios, 508
sustractivos, 510
Colores primarios aditivos, 508
Colores primarios sustractivos, 510
Combustible de hidrógeno, 124
Cometa Halley, 162
Complementariedad, 595-596
Componentes, vector, 82-84
Compresión, 232-233
en arcos, 234-235
en domos, 235
en transmisión del sonido, 377
en vigas, 232-233
Compuestos, 219
Compuestos químicos, 219
Condensación, 323-325
en atmósfera, 324-325
niebla y, 325
nubes y, 325
Conducción, 303-304, 432
transferencia de calor por, 315
Conductores, 412-413
Congelación, 294-296. *Véase también* Hielo
ebullición y, 327
fusión y, 327-328
rehielo y, 328
Conos, retina, 496-497, 508
Conservación de cantidad de movimiento, 97-103, 151-152
Conservación de cantidad de movimiento angular, 151-152
Conservación de carga, 409-410
Conservación de energía, 117-120
máquinas y, 120-121
movimiento de satélites y, 197-198
primera ley de termodinámica y, 340
Constante de gravitación universal (*G*), 163-164
Constante de Planck, 564, 584-585
Constante solar, 314
Contacto, carga por, 413-414
Contador de centelleo, 627
Contadores Geiger, 626
Contaminación térmica, 345
Contracción de la longitud, 675-677
Contracción de Lorentz, 676, 694
Contraparte de Maxwell a la ley de Faraday, 479-480, 607
Convección, 304-306
transferencia de calor por, 315
Copérnico, Nicolás, 5, 22, 33, 40
Córnea, 496
Corriente(s)
convección, 305-306
eléctrica. *Véase* Corriente eléctrica
océano, 343
Corriente alterna (CA), 437-438, 453, 474
Corriente directa (CD), 437-438, 453
Corriente eléctrica, 430-451
aislantes y, 412
alterna, 437-438, 453, 474
campos magnéticos y, 455-456, 458
choque a partir de, 435-436, 439
conductores y, 412-413
definición de, 432
directa, 437-438, 453
en galvanómetro, 461
en motores eléctricos, 462
flujo de carga y, 431-432, 438-440
inducción de, 471, 472. *Véase también* Inducción electromagnética
ley de Ohm y, 434-437
líneas de campo eléctrico y, 438-440
medición de, 461
propagación de, 438-440
rapidez y fuente de electrones en, 438-440
Corrientes oceánicas, 343
Corrimiento al azul, 366
Corrimiento al rojo, 366, 691-693
Corrimiento al rojo gravitacional, 366, 691-693
Corrimientos de fase, interferencia de onda y, 552
Cortocircuito, 445
Coulomb, 411
Coulomb, Charles, 411, 453
Crewe, Albert, 212
Cristales, en filtros de polarización, 555-556
Cristalino, 496
Crookes, William, 605
Cuantización, 584-585
Cuantos, 410, 583
luz, 582-599
Cuantos de luz. *Véase* Física cuántica
Curie, Marie, 616, 617
Curie, Pierre, 616, 617
Curva de radiación de luz solar, 508
Curva sinusoidal, 358


## D


Dalton, John, 209-210
Darwin, Charles, 10
Datación con carbono, 631-632
Datación radiométrica, 630-633
Davy, Humphrey, 470
De Broglie, Louis, 590-592, 609
Decaimiento radiactivo, 617, 625
transmutación y, 628-630
Decibeles, 394
Declinación magnética, 456-457
Defectos de visión, 537
Delfines, ecolocalización en, 387
Densidad
de aire, 266-267
ley de Boyle y, 270-271
de gases, 267, 268
de peso, 229-230
de sólidos, 229-230
flotar contra hundirse y, 251-255
frente a presión, 270-271
Densidad de peso, 229-230
Desaceleración, 44
Desastre nuclear en Chernobyl, 642, 644
Desecho radiactivo, 645
Desechos nucleares, 645
Desiertos, adaptación a, 295
Detectores de radiación, 626-628
Deuterio, fusión de, 650-652
Diamantes, ángulo crítico para, 533
Diferencia de potencial, 431
Difracción, 212, 547-548
de electrones, 590-592
de fotones, 590-592
Difracción de electrones, 590-592
Dilatación del tiempo, 663-673
en problema de viaje de gemelos, 668-673

Diodos, 437, 573
emisores de luz, 441, 573-574
Diodos emisores de luz (LED), 441, 573-574
Dipolos eléctricos, 417
Dirección
vectores y, 28. *Véase también* Vector(es)
velocidad y, 42-43
Discos láser, grabación de, 399-400
Dispersión, 511, 515, 529-530
en diamantes, 533
por rejillas de difracción, 551
Dispersión Rayleigh, 511
Distancia
en caída libre, 48-49, 50
gravedad y, 164-165
rapidez y, 41-42
trabajo y, 111
Disyuntores, 445
Dobson, John, 679
Doherty, Paul, 75
Domos, 235
Doppler, Christian, 366
du Chatelet, Emilie, 110
Dualidad onda-partícula, 588
difracción de electrones y, 590-592
en experimento de doble rendija, 549-550, 584, 588-590
fotón, 591
principio de incertidumbre y, 592-595
DVD, grabación de, 399-400

## E

$E = mc^2$ (equivalencia masa-energía), 645-648, 678-680
Ebullición, 325-327. *Véase también* Vapor de agua
congelación y, 327
géiseres y, 326
Eclipse lunar, 494
Eclipse solar, 494
Ecolocalización, 381-382, 387
Ecos, 379
Ecuación de Carnot, 345
Ecuación de lente delgado, 535
Ecuación de onda de Schrödinger, 610
Edison, Thomas, 119-120, 452
Efecto ámbar, 604
Efecto Doppler, 365-366, 569
Efecto fotoeléctrico, 585-587
Efecto invernadero, 312-313
Efecto Mössbauer, 692
Efecto Purkinje, 497
Eficiencia, 121-122
ideal, 345-347
Einstein, Albert, 10, 574
efecto fotoeléctrico y, 586-587, 603
equivalencia masa-energía y, 645-648, 678-680
movimiento browniano y, 210, 586
teoría cuántica y, 583, 584, 586, 587, 603, 610
teoría de gravitación y, 173
teoría de la relatividad especial y, 455-456, 658-685
teoría general de la relatividad y, 686-697
vida de, 659, 687
Eje de rotación, 137-138
Ejes coordenados, 663
Elasticidad, 230-231
conducción de sonido y, 376
Electricidad, 407-408
estática, 410. *Véase también* Electrostática de generador Van de Graaff, 424
magnetismo y, 455-456, 458-460
Electrodos, 475
Electroimanes, 459-460
Electrólisis, 124
Electrón(es), 213
carga y, 408-410
descubrimiento de, 604-606
expulsión por luz, 585-587
longitud de onda de, 590-591
magnetismo de espín de, 456
niveles de energía de, 564, 607-608
notación para, 629
órbitas de, 607-609
radiación de energía de, 607-608
vibración de, 489-490
Electrones de conducción, 432
Electrón-volt, 639
Electrostática, 406-429
aislantes y, 412
campos eléctricos y, 417
cargar y, 413-415
cargas eléctricas y, 408-411
conductores y, 412-413
conservación de carga y, 409-410
definición de, 407
ley de Coulomb y, 411-412
polarización de carga y, 416-417
potencial eléctrico y, 421
Elementos, 214-218
definición de, 214
frente a átomos, 214
isótopos de, 218
niveles de energía de, 564
sintéticos, 630
tabla periódica de, 215-218
transmutación de, 628-630. *Véase también* Transmutación
Elementos sintéticos, 630
Elipse, 194
Ellenstein, Marshall, 545
Emisión de luz, 562-577
espectros de, 566-567
espectros de absorción y, 569
excitación en, 564-566
fluorescencia y, 570-571
frecuencia pico y, 568
incandescencia y, 567-568
láseres y, 574-577
Enchufes aterrizados, 436
Energía, 109-131. *Véase también* Potencia de ser, 339
almacenamiento de, 423
cantidad frente a calidad de, 347
cinética. *Véase* Energía cinética
conservación de, 117-120
máquinas y, 120-121
movimiento de satélites y, 197-198
primera ley de termodinámica y, 340
de enlace, 646, 648
de mareas, 124
de satélite, 197-198
definición de, 113
dispersión de, 347-350
eficiencia y, 121-122
eléctrica
potencial, 421-422
producción de, 432, 473-475. *Véase también* Inducción electromagnética; Generadores
en cambios de fase, 328-332
en ondas sonoras, 379
en reposo, 678
eólica, 124
fuentes de, 123-125
geotérmica, 125
interna, 287-288, 339, 340
procesos adiabáticos y, 341-343
máquinas y, 120-121
masa, 339
masa en reposo, 680
masa y, 645-648, 678-680
mecánica, 113
medición de, incertidumbre en, 594
nuclear
fisión, 124, 644-645. *Véase también* Fisión nuclear
formas de, 116-117
fusión, 652
oscura, 176, 222
potencia y, 112
potencial, 113-114
eléctrica, 421-422
gravitacional, 113
radiante, 307-311, 314-315
reciclada, 119-120
solar, 123
como energía radiante, 308, 314-315
en fotosíntesis, 221
tecnología y, 118
teorema trabajo-energía y, 115-117
térmica, 287
trabajo y, 110-113
transformación de, 117-118
eficiencia y, 121-122
Energía cinética, 114-115
de satélite, 197-198
de traslación, 286-287
en evaporación, 321-322
rotacional, 286
temperatura y, 286-287
teorema trabajo-energía y, 115-117
vibratoria, 286
Energía de enlace, 646, 648
Energía de masa, 339
Energía de masa en reposo, 680
Energía eléctrica
almacenamiento de, 423
potencial, 421-422
producción de, 432, 473-475. *Véase también* Inducción electromagnética; Generadores
Energía en reposo, 678
Energía geotérmica, 125
Energía interna, 287-288, 339, 340
procesos adiabáticos y, 341-343
Energía mecánica, 113
Energía oscura, 176, 222
Energía potencial, 113-114
de satélite, 197-198
eléctrica, 421-422
gravitacional, 113
Energía potencial eléctrica, 421-422
Energía potencial gravitacional, 113
Energía radiante, 307-311
absorción de, 309-310
emisión de, 308-309
reflexión de, 310
solar, 308, 314-315. *Véase también* Energía solar
tipos de, 307
Energía reciclada, 119-120
Energía solar, 123, 314-315
como energía radiante, 308, 314-315
en fotosíntesis, 221
Energía térmica, 287
Enfriamiento. *Véase también* Transferencia de calor
adiabático, 341-343
ley de Newton de, 311-312
por ebullición, 326-327
por evaporación, 321-323
por expansión, 305-306
por radiación, 310-311
tasa de, 311-312
Enlace atómico, 220, 228
Enlaces covalentes, 220
Entropía, 348, 349-350
Equilibrio
de objetos en movimiento, 32-33
definición de, 30
dinámico, 32, 33
estático, 32, 33
fuerza de sostén y, 32
mecánico, 30, 32-33
Equilibrio dinámico, 32-33
Equilibrio estático, 32, 33
Equilibrio mecánico, 30, 32-33. *Véase también* Equilibrio
Equivalencia masa-energía ($E = mc^2$), 645-648, 678-680
Era de la razón, 176
Eratóstenes, 3-4
Escala absoluta de temperatura (Kelvin), 286, 338-339
Escala Celsius, 286, 338-339
Escala de temperatura internacional, 286
Escala Fahrenheit, 286, 338
Escala Kelvin, 286, 338-339
Escalamiento, 236-239
Escalas de temperatura, 286, 338-339
Escobillas, 462, 475
Espacio exterior. *Véase también* Viaje espacial; Espacio-tiempo
curvatura de, 695-696
temperatura de, 311
Espacio-tiempo
curvatura (deformación) de, 695-696
dilatación del tiempo y, 663-668
Espectro electromagnético, 408, 489-490
Espectrómetro de masa, 646
en seguridad aeroportuaria, 649
Espectrómetros, 551

Espectros atómicos, 222, 606-607
Espectros de absorción, 569
Espectros de emisión, 566-567
Espectroscopio, 566
Espejismos, 526-527, 528
Espejos, 522-523
Espejos planos, 522-523
Estabilidad, 143
Estación Espacial Internacional. *Véase* Viaje espacial
Estados cuánticos
  definición de, 564
  excitación en, 564-565
Estados de energía discretos, 564
Estampido sónico, 367-368
Estereogramas, 558-559
Estrellas colapsadas, agujeros negros a partir de, 174-175
Estructuras cristalinas, 227-229
Evaporación, 321-323
  condensación y, 323
Excitación atómica, 564-566, 567
  fluorescencia y, 570-571
  fosforescencia y, 571-572
  láseres y, 575
Expansión térmica, 291-296
Experimento de doble rendija, 549-550, 584, 588-590
Experimento Michelson-Morley, 660-661
Exploratorium, 75, 357
Extremos ambientales, adaptación a, 295

## F

Fabricación aditiva, 235
Factor de enfriamiento del viento, 312
Factor de Lorentz, 666, 677
Factores de conversión, 680
Fahrenheit, Gabriel Daniel, 286
Falkirk Wheel, 253
Farad, 470
Faraday, Michael, 470, 474
Fases de la materia, 321
  cambios de, energía requerida para, 328-332
  condensación, 323-325
  congelación, 294-296, 327-328
  ebullición, 325-327
  evaporación, 321-323
  fusión, 294, 327-328
  rehielo, 328
  sublimación, 322
Fermat, Pierre de, 520
Fermi, Enrico, 638, 641
Feynman, Richard, 209, 221, 222
Fibras ópticas, reflexión interna total en, 533
Filtros, Polaroid, 555-556, 558
Física
  atómica, 602-614
  bola de billar, 322
  como la ciencia básica, 15-16
  cuántica, 582-599. *Véase también* Física cuántica
  nuclear, 616-636
Física atómica, 602-614
Física cuántica, 584
  complementariedad en, 595-596
  constante de Planck en, 564, 584-585
  cuantización en, 584-585
  difracción de electrones en, 590-592
  dualidad onda-partícula en, 586-588. *Véase también* Dualidad onda-partícula
  efecto fotoeléctrico en, 585-587
  experimento de doble rendija en, 549-550, 584, 588-590
  principio de incertidumbre en, 592-595
  sistemas caóticos en, 596
Física de bola de billar, 322
Fisión. *Véase* Fisión nuclear
Fisión nuclear, 616-636, 639-649
  espontánea, 639
  frente a fusión nuclear, 650-651
  ganancia en energía a partir de, 646-648
  inducida, 639
  masa crítica en, 640
  perspectiva histórica acerca de, 638
  reacción en cadena en, 639-640
FitzGerald, George F., 660-661, 676
Flotabilidad
  en aire, 271-272
  en líquido, 249-250
  principio de Arquímedes y, 250-251
Flotación, 251-255
Fluido(s), 60. *Véase también* Gas(es); Líquido(s)
  convección en, 304-306
  líneas de corriente en, 273
Flujo
  rapidez de fluido y, 272-275
  remolinos en, 274
  turbulento, 274
Flujo de aire, presión y, 272-275
Flujo laminar, 273-274
Flujo turbulento, 274
Fluorescencia, 570-571
FM, señales de radio, 386, 548
Ford, Kenneth W., 375
Fosforescencia, 571-572
Fotografía
  cámaras estenopeicas y, 535
  exposición a luz en, 588
Fotones, 564-565, 583-588. *Véase también* Dualidad onda-partícula
  difracción de, 590-592
Fotosíntesis, 220-221
Fourier, Jean Baptiste Joseph, 392, 398
Fóvea, 496
Franjas de difracción, 547, 550-551
Franklin, Benjamín, 407, 415, 604-605
Fraunhofer, Joseph von, 569
Frecuencia
  de onda, 359
  fundamental, 395
  natural, 382
  pico, 568
Frecuencia modulada (FM), señales de radio, 386
Frecuencia natural, 382
Frecuencia pico, 568
Frentes de onda, 527-528, 545-547
Fresco, Jacque, 133
Fricción, 59-61
  carga por contacto y, 413-414
  conservación de cantidad de movimiento y, 100
  deslizamiento, 60
  energía cinética y, 116
  estática, 60
  fluido, 60
  inercia y, 24-25
  resistencia del aire y, 60
Fricción estática, 60
Frío, adaptación a, 294-296
Frisch, Otto, 638
Fuente, Carles, 490
Fuerza(s), 28, 58
  acción-reacción
    con diferentes masas, 79-81
    ley de, 76-85
    vectores y, 76-79
  aceleración y, 58-59, 63-64
  aparente, 148
  centrífuga, 147-150
  centrípeta, 145-146
  de flotación, 249, 250-251
  débil, 411
  eléctrica, 408-412
    ley de Coulomb y, 411-412
    medición de, 461
  en interacciones, 75-76
  en sistema, 77-78
  ficticia, 148
  frente a momento de torsión, 139
  frente a presión, 245-246
  fuerte, 622-624
  impulso y, 92-95
  inercial, 148
  interplanetaria, 175-176
  magnética, 454, 460-462
  máquinas y, 120-121
  movimiento y, 28-30
  neta. *Véase* Fuerza neta
  normal, 32
  sobre diferentes masas, 79-81
  sostén, 32
  trabajo y, 111
  unidades de, 27, 30
  vectores y, 28-29. *Véase también* Vector(es)
Fuerza centrífuga, 147-150
  en marco de referencia giratorio, 147-148
  gravedad simulada y, 148-149
Fuerza centrípeta, 145-146
Fuerza de flotación, 249, 250-251
Fuerza de reacción. *Véase* Fuerzas acción-reacción
Fuerza de sostén, 32
Fuerza débil, 411
Fuerza, escalamiento y, 236-239
Fuerza ficticia, 148
Fuerza fuerte, 622-624
Fuerza inercial, 148
Fuerza magnética, 454
  galvanómetro y, 461
  motores eléctricos y, 462
  sobre alambres portadores de corriente, 460-461
  sobre partículas cargadas en movimiento, 460
Fuerza neta, 28, 58-59
  aceleración y, 58-59, 63-64
  en segunda ley de Newton, 63-64
  energía cinética y, 115
  equilibrio y, 30, 32-33
  presión de líquido y, 248-249
Fuerza normal, 32
Fuerzas de acción y reacción
  con diferentes masas, 79-81
  ley de, 76-85
  vectores y, 76-79
Fuerzas eléctricas, 408-411
  ley de Coulomb y, 411-412
  medición de, 461
Fuerzas interplanetarias, 175-176
Fukushima, desastre nuclear, 642
Fulcro, 120
Función de densidad de probabilidad, 610
Función de onda, 610
Función de trabajo, 587
Fundamental, frecuencia, 395
Fusibles, seguridad, 445
Fusión
  calor latente de, 330
  nuclear, 649-652
  termonuclear, 118, 213, 650
Fusión (fundido), 294, 327-328
  rehielo y, 328
Fusión de hidrógeno, 650-652
Fusión nuclear, 649-652
Fusión termonuclear, 118, 213, 650

## G

*g* (aceleración debida a la gravedad), 64-65
*G* (constante gravitacional universal), 64-65
Gabor, Dennis, 559
Gafas, 537. *Véase* también Lentes
  índice de refracción de, 526
Galileo Galilei, 8, 9, 24, 34, 40, 58, 64, 197, 285
  experimentos con planos inclinados, 23-25, 45-46
  medición de rapidez por, 41
  rapidez de objetos en caída y, 23
  teoría copernicana y, 5, 40
  teoría de Aristóteles y, 23, 25, 34, 40
  teoría de inercia, 23-25, 26
  vida de, 40
Galvani, Luigi, 461
Galvanómetro, 461
Gases nobles, 215
Gases, 264-282, 321. *Véase también* Fases de la materia. *Véase* Atmósfera, condensación en, 323-325
  conducción de sonido en, 376
  convección en, 304-306
  densidad de, 267, 268
  efecto invernadero, 313
  electrificados, 276
  expansión de, 265
  frente a plasmas, 276
  nobles, 215
  presión de, principio de Pascal y, 255-256
Géiseres, 326
Gell-Mann, Murray, 622
Generador van de Graaff, 424, 431
Generadores, 432, 473-475
  MHD, 277, 475

turbogeneradores, 474-475
Van de Graaff, 424, 431
Generadores eléctricos, 432, 473-475
Generadores magnetohidrodinámicos, 277, 475
Generadores MHD, 277, 475
Geodésica, 695
Geometría
euclidiana, 695
para teoría de la relatividad general, 694-696
Geometría euclidiana, 695
Gilbert, William, 453, 604
Globos de helio, 271-272
Globos de hidrógeno, 272
Globos, flotabilidad de, 271-272
Grabación analógica, 399-400
Grabación de sonido, analógico frente a digital, 399-400
Grabación digital, 399-400
Grabaciones, analógicas frente a digitales, 399-400
Gran Colisionador de Hadrones, 460, 612
Gravedad, 160-181
aceleración debida a, 46-47, 64-65
agujeros negros y, 174-175
antimateria y, 221-222
caída libre y, 64-65
centro de, 140-145
estabilidad y, 143
ubicación, 141-142
distancia y, 164-165
doblamiento de luz por, 689-691
ingravidez y, 166-167
ley de gravitación universal y, 161-165, 176, 411, 694, 695
ley del inverso al cuadrado y, 164-165
mareas y, 167-170
masa y, 62
movimiento de proyectiles y, 183-189
peso y, 62, 166-167
rapidez de escape y, 174, 198-200
simulada, 148-149
Gravedad simulada, 148-149
Gravitación
ley de Newton de, 161-165, 176, 411, 694, 697
principio de equivalencia y, 689
teoría de Einstein, 173
teoría de la relatividad general y, 686-697
Gravitación universal, 175-176
ley de, 161-165, 176, 411, 694, 697
Grecia, antigua, ciencia en, 3-6
Grey, Burl, 27, 133

## H

Hahn, Otto, 638
Halley, Edmund, 162
Hechos, 8
Heisenberg, Werner, 593-594
Helio, 214, 215, 217
descubrimiento de, 569
Henry, Joseph, 470, 474
Hertz (Hz), 359
Hertz, Heinrich, 359, 584
Hibridación solar, 123
Hidráulica, 256
Hidrógeno, 214, 215
espectros atómicos de, 606
Hielo, 294-296
formación de, 327-328. *Véase también* Congelación
fusión de, 294, 327-328
sublimación de, 322
Hierro, dominios magnéticos en, 456-457. *Véase también* Magnetismo
Higgs, Peter, 612
Hipótesis atómica, 209-210
Hipótesis, puesta a prueba de, 9-12
Hologramas, 559, 575
Hooke, Robert, 231, 270
Hormigas
adaptación al calor, 295
tamaño frente a fuerza de, 237
Hornos de microondas, 418
Hubisz, John, 227
Hubisz, Jola, 227
Humedad, 323, 324
Humedad relativa, 324
Humor vítreo, 496
Hundimiento, 251-252
Huygens, Christian, 545-547, 584

## I

Icebergs, flotación de, 254
Ilusiones ópticas, 498, 499
Imagen real, 536
Imagen virtual, 522, 536
Impresión 3D, 235
Impresoras a color, 510-511
Impulso, 92-95
cambio en cantidad de movimiento e, 93-95
Incandescencia, 567-568
espectros de absorción y, 569
Inducción, carga por, 414-415
Inducción de campo, 479-480
Inducción electromagnética, 469
aplicaciones de, 471
autoinducción, 478
ciclo de, 473-474
definición de, 470
generadores e, 473-475
inducción de campo, 479-480
ley de Faraday y, 472
transformadores e, 475-478
transmisión de potencia e, 479
Inercia
aceleración e, 64-65
concepto de Galileo de, 23-25, 26
definición de, 25
fricción e, 24-25
ley de, 26, 30-31, 34, 85
momento de, 136
movimiento de la Tierra e, 33-34
rotacional, 136-139
Inercia rotacional, 136-139
Ingravidez, 166-167
Inhibición lateral, 498
Insectos, magnetismo en, 465
*Instrucción por pares* (Mazur), 161
Instrumentos de cuerda, 396
Instrumentos de percusión, 396, 397
Instrumentos de viento, 396
Instrumentos musicales, 396-397
Instrumentos musicales electrónicos, 397
Interferencia, 363-364, 384-387, 549-554, 587
batimientos e, 385-387
constructiva, 363, 384
corrimientos de fase e, 552
destructiva, 363, 384, 385
en experimento de doble rendija, 549-550, 584, 588-590
hologramas e, 559
ondas de electrones e, 608-610
ondas de luz e, 549-554
ondas estacionarias e, 364-365
ondas sonoras e, 384-385
película delgada, 552-554
un solo color, 552-553
Interferencia constructiva, 363, 384
batimientos e, 385-387
Interferencia de película delgada, 552-554
un solo color, 552-553
Interferencia destructiva, 363, 384, 385
batimientos e, 385-387
Interferómetros, 554, 660
Inversión de tiempo, 674-675
Inversiones de temperatura, 342
Iones, 215-217, 276, 410
Iones negativos, 276, 410
Iones positivos, 276, 410
Ionización, 626
Iridiscencia, 553-554
Iris, 496, 497
Isótopos, 218
Isótopos radiactivos, 621-622

## J

Jets. *Véase* Aviones
Joule, 111, 289
Juntas de expansión, 292

## K

Kelvin, Lord, 3, 337
Kepler, Johannes, 196-197
Kilocaloría, 289
Kilogramo (kg), 62
Kilowatt (kW), 112

## L

Lámparas, 441
color y, 506
de calle, excitación y, 565
fluorescentes, 506, 572-573
compactas, 441, 573
plasma en, 276
incandescentes, 572
Lámparas de vapor de mercurio, 565
Lámparas eléctricas. *Véase* Lámparas
Lámparas fluorescentes, 506, 572-573
compactas, 441, 573
plasma en, 276
Lámparas fluorescentes compactas (CFL), 441, 573
Lámparas incandescentes, 572
Láser(es), 574-577
hologramas y, 559, 575
Láser helio-neón, 576, 577
LASIK, 537
Laue, Max von, 227-228
LED (diodo emisor de luz), 441, 573-574
Lente
acromática, 537
anillos de Newton en, 553
cámara, 535
convergente, 533-534, 535-536
correctivo, 537
de lupa, 536
defectos en, 537
divergente, 534, 536
eje principal de, 534
formación de imagen por, 534-536
imágenes reales y, 536
imágenes virtuales y, 536
índice de refracción de, 526
longitud focal de, 534
plano focal de, 534
punto focal de, 534
refracción en, 533-534
Lente acromático, 537
Lentes convergentes, 533-534, 535-536
Lentes correctivos, 537
Lentes de contacto, 537
Lentes divergentes, 534, 536
Leverrier, Urbain, 175
Ley(es). *Véase también* Principio(s)
de acción-reacción, 76-85
de aceleración, 58, 64-65, 85
de Boyle, 270-271
de conservación, 98
de conservación de cantidad de movimiento, 97-103, 151-152
de conservación de cantidad de movimiento angular, 151-152
de conservación de carga, 409-410
de conservación de energía, 117-118
máquinas y, 120-121
primera ley de la termodinámica y, 339-343
de Coulomb, 411-412, 454
de enfriamiento, 311-312
de Faraday, 472, 479
contraparte de Maxwell a, 479-480
de gravitación universal, 161-165, 176, 411, 694, 697
de Hooke, 231
de inercia, 26, 30-31, 34, 85
de Lenz, 478
de movimiento
primera de Newton, 26, 30-31, 34, 85
segunda de Newton, 58, 63-64, 85
tercera de Newton, 76-85
de movimiento planetario, 196-197
de Ohm, 434-437
de reflexión, 521-522
de Snell, 526
de termodinámica

cero, 350
primera, 339-343, 349-350
segunda, 344-347, 349-350
tercera, 350
definición de, 8
inverso al cuadrado, 164-165
Ley cero de la termodinámica, 350
Ley de Boyle, 270-271
Ley de Coulomb, 411-412, 454
Ley de cuadrado inverso, 164-165
Ley de Faraday, 472, 479
contraparte de Maxwell a, 479-480, 607
Ley de Hooke, 231
Ley de Lenz, 478
Ley de Ohm, 434-437
choque eléctrico y, 435-436
Ley de Snell, 526
Leyes de conservación, 98
Leyes de movimiento de Newton
primera, 26, 30, 31-32, 34, 85
segunda, 58, 63-64, 85
tercera, 76-85
con diferentes masas, 79-81
vectores y, 82-85
*Libro: ¿Está usted de broma, Sr. Feynman?*, 209
Lim, Tenny, 183
Linder, Anne, 20, 21
Linder, Cedric, 20, 21
Líneas de absorción, 569
Líneas de corriente, 273, 275
Líneas de Fraunhofer, 569
Líneas de fuerza, 419
Líneas espectrales, 566
Líquido(s), 244-263, 321. *Véase también* Fases de la materia; Agua
capilaridad y, 258
condensación y, 323-325
conducción de sonido en, 376
congelación de, 294-296, 327-328
convección en, 304-306
desplazamiento de, 249-251
ebullición de, 325-327
evaporación de, 321-323
expansión de, 293-295
expansión térmica en, 292-295
flotabilidad y, 249-251
flotar frente a hundirse en, 251-255
líneas de corriente en, 273, 275
presión de, 246-249
principio de Pascal y, 255-256
rapidez y, 272-275
principio de Arquímedes y, 250-251
rapidez de flujo de, 272-275
tensión superficial de, 257-258
Locke, John, 176
Longitud de onda, 359
de De Broglie, 590-592, 609, 612
de ondas longitudinales, 362
de radiación, 307
efecto invernadero y, 312-313
transparencia y, 312, 313
rapidez de onda y, 362
Longitud de onda de De Broglie, 590-592, 609, 612
Longitud, ecuación de relatividad para, 681
Lorentz, Hendrik A., 660, 676
Luces. *Véase* Lámparas
Luces del norte, 464, 565
Luna
campo gravitacional de la Tierra y, 161, 170-173
distancia desde la Tierra, 5, 152
eclipse de, 494
mareas en, 170
movimiento de, 191
órbita de, 161
tamaño de, 4-5
Lupa, 536
Luz. *Véase también* Ondas electromagnéticas
absorción de, 506
blanca, 508
brillantez de, inhibición lateral y, 498
coherente, 574-575
color y, 505-518
como radiación electromagnética, 488. *Véase también* Espectro electromagnético
difracción de, 212, 547-548. *Véase también* Difracción
dispersión de, 511, 515, 529-530
en diamantes, 533
por rejilla de difracción, 551
doblamiento por gravedad, 689-691
estudios de Newton de, 505, 553, 584
fluorescente, 276, 441, 570-573
fotones y, 564-565, 583-588. *Véase también* Dualidad onda-partícula
frecuencia de, 489-490
incandescente, 567-569, 572
incoherente, 574-575
láser, 559, 574-577
modelo de resorte de, 491
opacidad a, 493
polarizada, 555-557, 558
rapidez de, 488, 524
a través de diferentes materiales, 492
en teoría de la relatividad especial, 661-662
reflexión interna total y, 531-533
refracción y, 524-528
reflexión de. *Véase* Reflexión de luz
refracción de, 524-526
teoría corpuscular de, 505, 553, 584, 587
teoría ondulatoria de, 545-547, 584, 586-587. *Véase también* Dualidad onda-partícula
transparencia a, 312, 313, 491-493
ultravioleta, 493
fluorescencia y, 570-571
opacidad a, 493
transparencia a, 493
visión y, 496-498
Luz artificial, 441
color y, 506
Luz blanca, 508
Luz coherente, 574-575
Luz incoherente, 574-575
Luz solar, curva de radiación de, 508
Luz ultravioleta, 493
fluorescencia y, 570-571
opacidad a, 493
transparencia a, 493


## M


Mácula, 496
Magnetismo, 452-468
electricidad y, 455-456, 458-460
electroimanes y, 459-460. *Véase también* Espectro electromagnético
en organismos vivientes, 465
motores eléctricos y, 462
primeros estudios de, 453
Magnetita, 465
Máquinas, 120-121
eficiencia de, 121-122
ideales, 121
Máquinas térmicas, 344-347
Marco de referencia, 659-662. *Véase también* Teoría de la relatividad especial
dilatación de tiempo y, 664-668
giratorio, fuerza centrífuga en, 147-148
simultaneidad y, 662-663
Marco de referencia giratorio, fuerza centrífuga en, 147-148
Mareas
atmosféricas, 170
lunares, 170
oceánicas. *Véase* Mareas oceánicas
terrestres, 170
Mareas muertas, 169
Mareas oceánicas, 167-170
como fuente de energía, 124
gravedad y, 167-170
muertas, 169
vivas, 168-169
Mareas vivas, 168-169
Masa, 58, 61-63
aceleración y, 61-63, 65, 79-81
atómica, 218
caída libre y, 65
centro de, 140-141. *Véase también* Centro de masa/gravedad
como energía condensada, 645-648, 678-680
crítica, en fisión nuclear, 640
frente a peso, 61
frente a volumen, 62
gravedad y, 62
nuclear, número atómico y, 646-647
segunda ley de Newton y, 63-64
tercera ley de Newton y, 79-81
Masa atómica, 218
Masa crítica, en fisión nuclear, 640
Masa por nucleón, 647-648
Masa promedio por nucleón, 647-648
Matemáticas, ciencia y, 8
Materia
fases de. *Véase* Fases de la materia
oscura, 176
Materia oscura, 176, 222
Maxwell, James Clerk, 479, 487, 584, 659
Maynez, Will, 20, 100
Mazur, Eric, 161
Meadows, Roxanne, 133
Mecánica cuántica, 583, 610-611
Mediciones, 3-8
incertidumbre de, 592-595
marco de referencia para, 659-665. *Véase también* Teoría de la relatividad especial
Mediciones científicas, 3-8
incertidumbre de, 592-595
marco de referencia para, 659-65. *Véase también* Teoría de la relatividad especial
Medidores eléctricos, 461
Meitner, Lise, 638
Meitnerio, 638
Mendeleev, Dmitri, 215
Mercurio (elemento)
en barómetro, 268
en lámparas fluorescentes compactas, 441
en termómetros, 285-286
Mercurio (planeta), órbita de, 694
Metales
conducción de calor por, 303-304
estructura cristalina de, 227-228
opacidad de, 493
Meteorología, termodinámica y, 341-343
Método científico, 8-12
Mezclas, 219
Michelson, A. A., 660-661
Microscopio de efecto túnel, 212-213
Microscopio electrónico de barrido, 212
Microscopios
de efecto túnel, 212-213
electrónicos, 212, 548, 591-592
electrónicos de barrido, 212
Microscopios electrónicos, 212, 548, 591-592
Milirem, 620
Millikan, Robert, 605-606
Mitchell, John, 453
Modelo de resorte de la luz, 491
Modelo planetario del átomo, 213, 215, 607-608
Moléculas, 220-221
movimiento de, temperatura y, 286-287
Momento de inercia, 136
Momento de torsión, 136, 139-140, 144
Momento de torsión neto, 140
Montañas, flotación de, 254
Morley, E. W., 660-661
Motores
eléctricos, 462
frente a generadores, 473
Motores eléctricos, 462
Movimiento
armónico simple, 358
browniano, 210
de átomos, 209, 210, 211
temperatura y, 286-287
dilatación del tiempo y, 664-668
equilibrio y, 32-33
fluido, 272-275
fuerza y, 28-30
leyes de Newton de
primera, 26, 30-31, 34, 85

segunda, 58, 64-65, 85
tercera, 76-85
marco de referencia para, 659-662. *Véase también* Marco de referencia
naturaleza relativista de, 40, 659-661. *Véase también* Teoría de la relatividad general; Teoría de la relatividad especial
onda, 360-365
percepción de, 497
planetario, 5, 22, 196-197
primera ley de Newton de, 26, 30, 31-32, 34, 85
proyectiles. *Véase* Movimiento de proyectiles
rotacional. *Véase* Movimiento rotacional
teoría aristotélica de, 21-22, 23, 25, 34
teoría copernicana de, 5, 22
teoría galileana de, 23-25, 34
transversal, 361
Movimiento armónico simple, 358
Movimiento browniano, 210, 586
Movimiento de fluido, rapidez y, 272-275
Movimiento de proyectiles, 183-205
componente horizontal de, 183-185
componente vertical de, 183-185
con trayectoria angulada, 186-189
con trayectoria horizontal, 184-185
de satélites, 190-198. *Véase también* Satélite(s)
rango horizontal y, 188-189
rapidez de escape y, 198-200
rapidez de lanzamiento y, 188-189
trayectoria parabólica de, 185
velocidad tangencial y, 191
Movimiento ondulatorio, 360-365
Movimiento rotacional, 132-159
cantidad de movimiento angular y, 150-152
de ruedas de ferrocarril, 135
eje de, 137-138
fuerza centrífuga y, 147-150
fuerza centrípeta y, 145-146
inercia rotacional y, 136-139
momento de torsión y, 136, 139-140, 144
movimiento circular y, 133-136
rapidez rotacional y, 133-136
rapidez tangencial y, 133-136
Muller, Derek, 91
Musicales, instrumentos, 396-397
Mutaciones, inducidas por radiación, 621
Myers, Fred, 452, 453

## N

Nanotecnología, 239
Navegación animal
ecolocalización en, 381-382, 387
magnetismo en, 465
Neblina, 325
Neptunio, 643, 644
Neptuno, descubrimiento de, 175
Nervio óptico, 496
Neutrino, 628
Neutrones, 213-214, 218. *Véase también* Nucleones
carga y, 408-410
en fisión nuclear, 630-640
fuerza fuerte y, 622-624
Newton (N), 27, 30, 62
Newton, Isaac, 25, 161-162, 231, 505, 537
estudio de luz, 505, 553, 584
ley de enfriamiento, 311-312
ley de gravitación universal, 161-165, 176, 411, 694, 697
mareas oceánicas, 167
movimiento de satélites, 191
*Principia Mathematica*, 25, 26
vida de, 58, 161-162
Nitrógeno, transmutación de, 630
Noddack, Ida, 638
Nodos, de ondas estacionarias, 364
Notas, musicales, 392
Nube(s), 325
color de, 514
Nubes de electrones, 609
Núcleo. *Véase* Núcleo atómico
Núcleo atómico, 213-214, 409
componentes de, 622
descubrimiento de, 603-604
energía de enlace de, 646
fuerza fuerte y, 622-624
masa por nucleón en, 647-648
niveles de energía en, 622, 646-648
tamaño de, 623-624
Nucleones, 213, 622
fuerza fuerte entre, 622-624
masa promedio por, 647-648
quarks en, 622
Número atómico, masa nuclear y, 646-647
Número de masa, 218

## O

Objetos que caen
distancia recorrida por, 48-49, 50
en caída libre, 46-50
rapidez de, 21, 23, 46-47, 50
resistencia del aire y, 49
tercera ley de Newton y, 79-81
Oersted, Hans Christian, 453
Ohm (Ω), 431, 434
Ohm, Georg Simon, 431, 434
Ojo, estructuras de, 496
Ollas de presión, 325-326
Onda(s), 357
amplitud de, 359
calor, 489, 492
curva sinusoidal y, 358
de agua, 360, 365-366, 549
de choque, 367-368
de materia, 609, 610
de proa, 367
de radio, 379
difracción de, 212, 547-548. *Véase también* Difracción
efecto Doppler y, 365-366
electromagnética, 307, 488-490
electrón, 608-610
estacionaria, 364-365
frecuencia de, 359
gravitacional, 696
infrarroja, 492
interferencia de, 363-364, 384-387, 549-554. *Véase también* Interferencia
longitudinal, 361-362, 555
luz. *Véase* Ondas de luz
movimiento de pulso y, 376-377
periodo de, 359
plano-polarizada, 555
principio de Huygens y, 545-547
propiedades de, 358-360
rapidez de, 362-363
sonido. *Véase* Ondas sonoras
superposición de, 363, 398, 549-551
transversal, 361-362, 555
vibraciones y, 357. *Véase también* Vibraciones
Onda-partícula, 596-597
dualidad. *Véase* Dualidad onda-partícula
Ondas de agua, 360
efecto Doppler y, 365-366
interferencia de, 549
Ondas de calor (infrarrojas), 489, 492
Ondas de choque, 367-368
Ondas de electrones, 608-610
Ondas de luz, 545-561
difracción de, 547-548
efecto Doppler y, 366, 569
hologramas y, 559
interferencia de, 549-551
polarización de, 555-557, 558
principio de Huygens y, 545-547
superposición de, 549-551
visión 3D y, 557-558
Ondas de materia, 609, 610
Ondas de proa, 367
Ondas de radio, 379
Ondas electromagnéticas, 488-490. *Véase también* Luz
energía radiante y, 307
frecuencia de, 489-490
velocidad de, 488-489
Ondas estacionarias, 364-365
Ondas gravitacionales, 696
Ondas infrarrojas, 492
Ondas longitudinales, 361-362, 555
Ondas P, 362
Ondas plano-polarizadas, 555
Ondas S, 362
Ondas sonoras, 375-378, 379
batimientos y, 385-387
como ondas longitudinales, 362
difracción de, 547, 548. *Véase también* Difracción
efecto Doppler y, 366, 569
energía en, 379
infrasónicas, 376
interferencia de, 384-385
ultrasónicas, 376, 381-382
Ondas sonoras infrasónicas, 376
Ondas sonoras ultrasónicas (ultrasonido), 376, 381-382
Ondas transversales, 361-363, 555
Opacidad, 493, 506
Oppenheimer, Frank, 75, 357, 358
Órbita(s). *Véase también* Satélite(s)
circular, 192-193, 197
conservación de energía y, 197-198
de Luna, 161
de planetas, 5, 22, 196-197, 694
electrónica, 409, 607-609
elíptica, 194-195, 198
Orbital, 409
Órbitas circulares, 192-193, 197
Órbitas elípticas, 194-195, 198
Oscilación, 506
Osciloscopio, 391, 392, 398
Oxidación, 221

## P

Palanca, 120
eficiencia de, 121
Parábola, 185
arco como, 234-235
Paralaje, 557
Parcelas, adiabáticas, 341-343
Pares de fuerzas, 76-79
Pascal (Pa), 245
Pascal, Blaise, 245, 520
Patrones de difracción, 227-228
Patrones de difracción de rayos X, 227-228
Patrones de interferencia, 363-364
holográfica, 559
Pauli, Wolfgang, 628
Péndulo, 358
Penumbra, 494
Penzias, Arno, 311
Pérdida auditiva
inducida por ruido, 394-395
relacionada con la edad, 393
Perigeo, 198
Periodo, de onda, 359
Perrin, Francis, 640
Perturbaciones, 175
Peso, 61-63
del aire, 266-267
escalamiento y, 236-239
flotabilidad y, 249-250, 271-272
flotar frente a hundirse y, 251-255
frente a masa, 61
gravedad y, 62, 166-167
Pichones, magnetismo en, 465
Piedras imán, 453
Pigmentos coloreados, mezclas de, 509-511
Pigmentos, mezclas de, 509-511
Pila atómica, 642
Planck, Max, 583, 584, 638
teoría cuántica de, 583-584, 586
Planeta(s)
bamboleo orbital en, 175
descubrimiento de, 175-176
enanos, 175-176
fuerzas entre, 175-176
movimiento de 5, 22, 196-197, 694
rapidez de escape de, 198-200
Planetas enanos, 175-176
Planos inclinados, aceleración sobre, 23-25, 45-46
Plasma, 276-277, 321
Plutón, descubrimiento de, 175-176
Plutonio, 643, 644
Polarización, 555-557, 558

Polarización de carga, 416-417
Polarización eléctrica, 416-417
Poleas, 120-121
Polipasto, 121
Polonio, 616, 617
Polos magnéticos, 454-455
  de la Tierra, 462-463
Positrones, 221, 680
Potasio, radiación interna de, 620
Potencia, 112. *Véase también* Energía
  de mareas, 124
  definición de, 477
  eléctrica
    almacenamiento de, 423
    producción de, 432, 473-475
  eólica, 124
  geotérmica, 125
  MHD, 277
  nuclear, 644-645
    fisión, 124, 644-645
  solar, 314-315
  trabajo y, 112
  turbogenerador, 474-475
  unidad de, 112
  vapor, 346-347
Potencia de cristal, 229
Potencia de mareas, 124
Potencia de vapor, 346-347
Potencia eléctrica, 440
  producción de, 432, 473-475. *Véase también* Generadores
  transferencia de, 453, 475-478
  transmisión de, 479
Potencia eólica, 124
Potencia geotérmica de piedra seca, 125
Potencia MHD de metal líquido, 475
Potencia solar, 314-315
Potencial eléctrico, 422, 433
  choque y, 435-436
  frente a voltaje, 422, 433
  medición de, 461
Pound, Robert, 692
Precesión, 694
Precesión orbital, 694
Presión, 245-249
  atmosférica, 247, 265-266
    medición de, 268-269
  definición de, 245
  estancamiento, 273
  frente a densidad, 270-271
  frente a fuerza, 245-246
  frente a volumen, 270-271
  líquido, 246-249
    principio de Pascal y, 255-256
  total, 247
  unidades de, 245
Presión atmosférica, 247, 266-269
  medición de, 268-269
  unidades de, 268
Presión de agua, 246-249
Presión de estancamiento, 273
Presión de fluido
  principio de Pascal y, 255-256
  rapidez y, 272-275
Presión del aire, 266-267
*Principia Mathematica* (Newton), 25, 26
Principio(s). *Véase también* Ley(es)
  de Arquímedes
    para aire, 271-272
    para líquidos, 250-251
  de Bernoulli, 272-275
  de combinación de Ritz, 607
  de correspondencia, 611-612, 680-681
  de equivalencia, 687-689, 692
  de flotación, 253
  de Huygens, 545-547
  de incertidumbre, 592-595
  de Pascal, 255-256
  de superposición, 363, 398
  de tiempo mínimo de Fermat, 520-521
  definición de, 8
Principio de Arquímedes, para aire, 271-272
Principio de Bernoulli, 272-275
Principio de combinación de Ritz, 607
Principio de correspondencia, 611-612, 680-681
Principio de equivalencia, 687-689, 692
Principio de Huygens, 545-547
Principio de incertidumbre, 592-595
Principio de Pascal, 255-256
Principio de superposición, 363, 398
Principio del tiempo mínimo de Fermat, 520-521
Prismas, 525
  reflexión interna total en, 532
PRK (queratectomía fotorrefractiva), 537
Problema de viaje de los gemelos, 668-673
Procesos adiabáticos, 341
Propulsión de cohetes, 80. *Véase también* Viaje espacial
Protactinio, 629
Protones, 213-214, 218. *Véase también* Nucleones
  campos magnéticos y, 465
  carga y, 408-410
  en rayos cósmicos, 464
  fuerza fuerte y, 622-624
Proyectil(es), 183
  satélites como, 190-198
Proyecto Manhattan, 638, 640, 641
Pseudociencia, 13, 229
Pulso, movimiento de, 376-377
Punto ciego, 496
Pupila, de ojo, 496, 497-498, 537
Pupilometría, 498

## Q

Quarks, 213, 622
Quásares, 175
Queratectomía fotorrefractiva (PRK), 537
Quintaesencia, 21

## R

Rad, 619-620
Radiación
  ambiental, 619-622
  daño celular por, 620-621
  de fondo cósmico, 311, 464, 619
  de microondas, 418, 585
  dosis de, 620-621
  en seguridad alimentaria, 618, 632
  enfriamiento por, 310-311
  frecuencia de, 307
  frecuencia pico de, 568
  fuentes de, 619
  gamma, 617-618, 622
  infrarroja, 308-309
  ionización y, 626
  longitud de onda de, 307
    efecto invernadero y, 312-313
    transparencia y, 312, 313
  mutaciones por, 621
  terrestre, 308
  transferencia de calor por, 307-311, 315. *Véase también* Energía radiante
  unidades de, 619-620
Radiación de fondo, 311, 464, 619
Radiación de fondo cósmico, 311, 464, 619
Radiación de microondas, 418, 585
Radiación electromagnética, luz como, 488
Radiación infrarroja, 308-309
Radiación terrestre, 308
Radiactiva, vida media, 625
Radiactividad, 617
Radio, 616, 617
Radón, 619
Rapidez, 41-42. *Véase también* Velocidad
  angular, 133-134
  como cantidad escalar, 43, 51
  contra velocidad, 42-43, 51
  de escape, 174, 198-200
  de lanzamiento, 189
  de luz. *Véase* Luz, rapidez de
  de objetos en caída, 21, 23, 46-47, 50
  de onda, 362-363
  definición de, 41
  del sonido, 378-379
  distancia y, 41-42
  fluido, presión y, 272-275
  fricción y, 60
  instantánea, 41, 46
  lineal, 133
  medición de, 659-660
  promedio, 41-42
  relativista, 664
  rotacional, 133-136
  tangencial, 133, 134
  terminal, 66
  unidades de, 41
Rapidez angular, 133-134
Rapidez de lanzamiento, 189
Rapidez de onda, 362-363
Rapidez lineal, 133
Rapidez promedio, 41-42
Rapidez tangencial, 133-134
Rapidez/velocidad de escape, 174, 198-200
Rapidez/velocidad instantánea, 41, 46
Rapidez/velocidad terminal, 66
Rarefacción, 362, 377
Rassool, Roger, 627
Rayo, 494
Rayos (partículas) alfa, 603-604, 617-618, 624
  en transmutación, 628-630
Rayos (partículas) beta, 617-618, 624
  en transmutación, 628-639
Rayos cósmicos, 464
Rayos de luz, 494
Rayos (partículas) gamma, 617-618, 622
Rayos X, 616-617
  en modelo atómico de Bohr, 608
Reacción en cadena, en fisión nuclear, 639-640
Reacción química, 221
Reacciones químicas, 221
Reactores
  fisión, 641-645
    reproductor, 644
  fusión, 652
Reactores nucleares
  fisión, 641-645
    reproductor, 644
  fusión, 652
Reactores reproductores, 644
Rebka, Glen, 692
Referencia, marco. *Véase* Marco de referencia
Reflexión
  de energía radiante, 310
  de luz, 505-506, 520-524
    ángulo crítico y, 531-533
    arcoíris y, 529-530
    definición de, 520
    de sonido, 379-380, 506
    difusa, 523-524
    en espejos, 522-523
    en superficies pulidas, 523-524
    especular, 521
    interna total, 531-533
  definición de, 520
  ley de, 521-522
Reflexión difusa, 523-524
Reflexión especular, 521
Reflexión interna total, 531-533
Refracción, 524-528
  causa de, 527-528
  de sonido, 380-382
  definición de, 524
  en diamante, 533
  en lentes, 533-534
  espejismos y, 526-527, 528
  índice de, 526
  prismáticos, 525
Regla de equilibrio, 30, 33
Regla del paralelogramo, 29
Rehielo, 328
Rejilla de difracción, 551
Relatividad. *Véase* Teoría de la relatividad general; Teoría de la relatividad especial
Religión, ciencia y, 12-14
Relojes
  corrimiento gravitacional al rojo y, 691-693
  dilatación del tiempo y, 664-667
Relojes de luz, 664
Rem, 620
Remolinos, 274
Resistencia al deslizamiento, 60
Resistencia del aire (arrastre aerodinámico)
  aceleración y, 64-67
  caída libre y, 60
  rapidez de un objeto que cae y, 49
Resistencia eléctrica, 433-434
  ley de Ohm y, 434-437
  unidad de, 431, 434

Resonancia, 382-383
Resonancia magnética, 465
Resultantes, 28-29
Reverberaciones, 380
Ritz, Walter, 607
Roentgen, Wilhelm, 616-617
Rueda Pelton, 96
Ruedas de ferrocarril, movimiento rotacional de, 135
Ruedas, movimiento de. *Véase* Movimiento rotacional
Ruido, 392
Ruido blanco, 392
Rumford (Benjamin Thompson), 285, 287, 339
Rutherford, Ernest, 60, 603-604, 606, 607
Ryan, Paul, 331
Rydberg, Johannes, 606-607

## S

Sagan, Carl, 563
Salto, tiempo en el aire y, 50, 190
Saltos cuánticos, 607-608
Satélite(s), 190-198
  definición de, 190
  en Sistema de Posicionamiento Global (GPS), 197
  monitorización de la Tierra, 195
  movimiento de, conservación de energía y, 197-198
  órbitas de
    circular, 192-193
    elíptica, 194-195
  planetas como, 196-197
  rapidez de escape de, 198-200
Schrödinger, Erwin, 610
Seguridad aeroportuaria, espectrometría de masas en, 649
Segway, Transportador Humano, 144
Semiconductores, 412-413
Señales de radio, AM/FM, 386, 548
Simultaneidad, 662-663
Síntesis newtoniana, 161
Sistema(s)
  binario, 399
  caótico, 596
  definición de, 340
  desorden en, 348, 349-350
  fuerzas en, 77-78
Sistema de Posicionamiento Global (GPS), 197
Sistemas binarios, 399
Sistemas caóticos, 596
Snow, C. P., 687
Sobretonos, 395
Sol. *Véase también* Solar
  campo gravitacional de, 173
  campo magnético de, 463
  distancia desde la Tierra, 6-7
  eclipse de, 494
  fusión termonuclear en, 650, 651
  rapidez de escape de, 198-200
  tamaño de, 314
Sólidos, 226-243, 321. *Véase también* Fases de la materia
  amorfo, 228
  compresión en, 232-235
  conducción de sonido en, 376
  densidad de, 229-230
  elasticidad de, 230-231
  escalamiento de, 236-239
  estructura cristalina de, 227-229
  expansión térmica en, 292
  fusión de, 294, 327-328
  tensión en, 232-235
Sólidos amorfos, 228
Sombras, 494-495
  color de, 509
Sonda *Pioneer 10*, rapidez de escape de, 200
Sonido, 374
  altura y, 376, 393
  amplificación de, 378
  ángulo de incidencia de, 379
  batimientos y, 385-387
  calidad de, 395
  dispersión de, 511
  efecto Doppler y, 569
  en aire
    rapidez de, 378-379
    transmisión de, 376-378
  frecuencia de, 376
  frecuencia natural y, 382
  intensidad de, 394
  musical. *Véase* Sonidos musicales
  navegación animal por, 381-382, 387
  origen de, 375-376
  rapidez de, 378-379
  reflexión de, 379-380, 506
  resonancia y, 382-383
  reverberación de, 380
  sonoridad de, 394
  transmisión de, 376-378
    compresión en, 377-378
    rarefacción en, 377-378
  unidades de, 394
  vibraciones forzadas y, 382
Sonidos musicales, 391-403
  altura y, 393
  análisis de Fourier y, 397-399
  calidad de, 395-396
  frente a ruido, 392
  grabación analógica contra digital de, 399-400
  intensidad sonora y sonoridad y, 394
  notas y, 392
Sonoridad, 394
Steiger, Walter, 627
Strassmann, Fritz, 638
Sublimación, 322
Superconductores, 413
  electroimanes como, 459-460
Superficies pulidas
  anillo de Newton y, 553
  reflexión de, 523-524
Superposición, de ondas, 549-551

## T

Tabla periódica, 215-218
  transmutación y, 628-630
Taquiones, 675
Tecnología
  beneficios de, 118
  valoración de riesgo para, 14
Tecnología antirruido, 385
Televisores de plasma, 276
Temperatura, 285-287. *Véase también* Enfriamiento; Calor
  aire, 305
  condensación y, 324-325
  presión y, 341-343
  cero absoluto, 286, 337-339
  de espacio exterior, 311
  energía cinética y, 286-287
  energía interna y, 287-288, 339, 340
  movimiento atómico/molecular y, 286-287
  procesos adiabáticos y, 341-343
  transferencia de calor y, 304, 308, 312
Temperatura del aire, 305
  condensación y, 324-325
  presión y, 341-343
Temperaturas extremas, adaptación a, 295
Tensión, 30, 232-233
  sobre arcos, 234-235
  sobre vigas, 232-233
  superficial, 257-258
Tensión superficial, 257-258
Teorema trabajo-energía, 115-117
Teoría, 9
Teoría corpuscular de la luz, 505, 553, 584
  dualidad onda-partícula y, 586-588. *Véase también* Dualidad onda-partícula
Teoría cuántica, 584-585, 586
  nacimiento de, 583-584
Teoría de la relatividad especial, 658-685
  cantidad de movimiento relativista y, 677-678
  contracción de longitud y, 675-677
  dilatación del tiempo y, 663-673
  equivalencia entre masa y energía y, 645-648, 678-680
  espacio-tiempo y, 663-668
  experimento Michelson-Morley y, 660-661
  marco de referencia y, 659-662
  postulados de, 661-662
  principio de correspondencia y, 680-681
  problema de viaje de los gemelos y, 668-673
  simultaneidad y, 662-663
  suma de velocidades y, 673-675
Teoría de la relatividad general, 686-697
  corrimiento gravitacional al rojo y, 366, 691-693
  curvatura de espacio-tiempo y, 695-696
  doblamiento de luz por gravedad y, 689-691
  ley de gravitación de Newton y, 694, 697
  movimiento planetario y, 694
  nueva geometría para, 694-696
  ondas gravitacionales y, 696
  órbita de Mercurio y, 694
  precesión y, 694
  principio de equivalencia y, 687-689, 692
Teoría ondulatoria de la luz, 545-547, 584, 586
  dualidad onda-partícula y, 588. *Véase también* Dualidad onda-partícula
Terapia de radiación, 620-621
Térmicas, máquinas, 344-347
Termodinámica, 336-353
  cero absoluto y, 337-339
  conservación de energía y, 339-343
  definición de, 336
  dispersión de energía y, 347-350
  energía interna y, 339, 340
  entropía y, 348, 349-350
  ley cero de, 350
  primera ley de, 339-343, 349-350
  procesos adiabáticos y, 341
  segunda ley de, 344-347, 349-350
  tercera ley de, 350
Termómetros, 285-286, 287
  infrarrojos, 308-309
Termómetros centígrados, 286
Termómetros infrarrojos, 308-309
Termostato, 293
Tesla, Nikola, 453, 474
Testimonios, frente a evidencia experimental, 229
Thermos, 315
Thompson, Benjamin, 285, 287
Thomson, Joseph John (J. J.), 603, 605, 606
Thomson, William (lord Kelvin), 286, 337, 339
Tiempo
  corrimiento al rojo gravitacional y, 366, 691-693
  distancia en caída libre y, 48
  ecuación relativista para, 681
  en teoría de la relatividad especial, 663-675
  espacio-tiempo, 663-668
  impulso y, 92-95
  medición de, incertidumbre en, 594
  rapidez y, 41-42
  relatividad de, 663-675, 691-693
  viaje espacial y, 668-675
Tiempo "colgado" (en el aire), 50, 190
Tiempo relativista, 663-675, 664, 691-693
Tierra
  aceleración de, 79
  campo gravitacional de, 161, 170-173
  campo magnético de, 462-464
  distancia a la Luna, 5, 152
  distancia al Sol, 6-7
  edad de, 337
  energía radiante de, 311
  forma esférica de, 175
  mareas en, 170
  movimiento de, 22, 33-34
  rapidez de escape de, 199
  tamaño de, 3
Timbre, 395
Tiras bimetálicas, 292
Tono
  armónico, 395
  calidad de, 395-396
  parcial, 395
Tonos parciales, 395
Torio, transmutación de, 628-629
Torre inclinada de Pisa, 23

Torricelli, Evangelista, 245, 268
Trabajo, 110-113
  definición de, 110
  máquinas y, 120-121
  neto, 115-116
  potencia y, 112
  unidad de, 111
Trabajo neto, 115-116
Transferencia de calor, 287-288, 302-319. *Véase también* Enfriamiento
  calentamiento global y, 313-314
  control de, 315
  dirección de, 344-347
  efecto invernadero y, 312-313
  en botella de vacío, 315
  por conducción, 303-304, 315
  por convección, 304-306, 315
  por radiación, 307-311, 315
  potencial solar y, 314-315
  temperatura y, 304, 308, 312
  termodinámica y, 336-350. *Véase también* Termodinámica
  termos, 315
Transformadores, 453, 475-478
Transistores, 412-413
Transmutación, 628-630
  artificial, 630
  datación radiométrica y, 507
  del agua, 514-515
  natural, 628-629
Transpiración, 322
Trazadores radiactivos, 621-622
Trenes
  maglev, 459
  movimiento rotacional de ruedas, 135
Trenes maglev, 459
Tritio, fusión de, 651, 652
Tuberías de luz, reflexión interna total en, 533
Tubo de Crookes, 605
Tubo de rayos catódicos, 605
Tubos de neón
  excitación y, 465
  líneas espectrales de, 566
  plasma en, 276
Turbogeneradores, 474-475
Tyson, Neil deGrasse, 563

## U

Último teorema (Fermat), 520
Uma (unidad de masa atómica), 218
Umbra, 494
Unidad de masa atómica (uma), 218, 646
Universo, expansión de, 176
Uranio
  decaimiento de, 633
  en datación radiométrica, 633
  enriquecido, 640-641
  fisión de, 638-649. *Véase también* Fisión nuclear
  transmutación de, 628
  vida media de, 625
Urano, descubrimiento de, 175

## V

Valoración de riesgo, 14
  de irradiación de alimentos, 632
Van Allen, James A., 464
  cinturón de radiación, 464
Vapor, 323
Vapor de agua
  condensación y, 323-325
  evaporación y, 321-323
Vaporización, calor latente de, 330-331
Vector(es), 28-30
  cantidad de movimiento como, 97
  componentes de, 82-84
  definición de, 28
  descomposición de 82-84
  fuerza, 29-30
  resultante de, 28-29
  suma de, 28-29
  tercera ley de Newton y, 82-85
  velocidad, 51, 84
Vectores de fuerza, 29-30
Vectores de velocidad, 51, 84
Velocidad, 42-43. *Véase también* Rapidez
  aceleración y, 43-46, 50
  cambio de, 43
  componente horizontal de, 84, 183-185
  componentes vectoriales de, 84, 183-185
  constante, 43
  de deriva, 439
  de escape, 174, 198-200
  de ondas electromagnéticas, 488-489
  frente a rapidez, 42-43, 51
  instantánea, 41, 46
  relativa, 673-674
  suma de, 673-675
  tangencial, de proyectiles, 191
  terminal, 66
Velocidad constante, 43
Velocidad de deriva, 439
Velocidad tangencial de proyectiles, 191
Viaje espacial
  contracción de la longitud y, 676-677
  dilatación del tiempo y, 668-673
  gravedad simulada para, 148-149
  ingravidez en, 166-167
  principio de equivalencia y, 687-689
  problema del viaje de gemelos y, 668-673
  propulsión de cohetes y, 687-689
  teoría de la relatividad especial y, 668-675
  teoría de la relatividad general y, 687-689
  velocidad de escape en, 174
Vibración simpática, 383
Vibraciones, 357. *Véase también* Onda(s)
  de electrones, 489-490
  de péndulo, 358
  de sonido, 375-376
    musical, 393
  forzadas, 382
  frente a oscilaciones, 506
  simpáticas, 383
Vibraciones forzadas, 382
Vida media radiactiva, 625
Vidrio
  índice de refracción de, 526
  reflexión interna total en, 532
  refracción a través, 524-525
  transparencia de, 491-492
Vigas I, 233
Vigas, carga soportada por, 232-233
Visión, 496-498
  color, 496-497, 508. *Véase también* Color(es)
  estereoscópica (3D), 557-558
Visión de color, bastones y conos en, 496-497, 508
Visión estereoscópica, 557-558
Visualización médica
  resonancia magnética, 465
  trazadores radiactivos en, 622
Volante de inercia, 136
Volt (V), 433
Volta, Allesandro, 433
Voltaje, 422, 433
  de corriente CA, 437
  inducción de, 470-472. *Véase también* Inducción electromagnética
  ley de Ohm y, 434-437
Voltímetro, 461
Volumen
  de líquido desplazado, 249, 250-251. *Véase también* Flotabilidad
  escalamiento y, 236-239
  frente a masa, 62
  frente a presión, 270-271

## W

Watt (W), 112, 440
Watt, James, 112
Wells, H. G., 125
Westerberg, Karl, 20
Westinghouse, George, 452, 474
Wheelet, John A., 222
Whitlach, Norman, 391, 392
Wiles, Andrew, 520
Willey, Dave, 331
Wilson, Robert, 311

## Y

Yan, Helen, 303, 310
Yin y yang, 596
Young, Thomas, 549-550, 584, 588-590

## Z

Zetterberg, Johan, 265
Zetterberg, Per Olof, 265

# ALGUNAS FECHAS SIGNIFICATIVAS EN LA HISTORIA DE LA FÍSICA

| | |
|---|---|
| **ca. 320 A.E.A.** | **Aristóteles** describe el movimiento en términos de tendencias naturales. |
| **ca. 250 A.E.A.** | **Arquímedes** descubre el principio de flotabilidad. |
| **ca. E.A. 150** | **Ptolomeo** refina el sistema del mundo con centro en la Tierra. |
| **1543** | **Copérnico** publica su sistema del mundo con centro en el Sol. |
| **1575-1596** | **Brahe** mide las posiciones precisas de los planetas en el cielo. |
| **1609** | **Galileo** usa por primera vez un telescopio como herramienta astronómica. |
| **1609/1619** | **Kepler** publica tres leyes del movimiento planetario. |
| **1634** | **Galileo** avanza en la comprensión del movimiento acelerado. |
| **1661** | **Boyle** relaciona la presión y el volumen de los gases a temperatura constante. |
| **1676** | **Roemer** demuestra que la luz tiene una rapidez finita. |
| **1678** | **Huygens** desarrolla una teoría ondulatoria de la luz. |
| **1687** | **Newton** presenta la teoría de la mecánica en sus *Principia.* |
| **1738** | **Bernoulli** explica el comportamiento de los gases en términos de movimientos moleculares. |
| **1747** | **Franklin** sugiere la conservación del "fuego" (carga) eléctrico. |
| **1780** | **Galvani** descubre la "electricidad animal". |
| **1785** | **Coulomb** determina con precisión la ley de fuerza eléctrica. |
| **1795** | **Cavendish** mide la constante gravitacional *G*. |
| **1798** | **Rumford** argumenta que el calor es una forma de movimiento. |
| **1800** | **Volta** inventa la batería. |
| **1802** | **Young** usa la teoría ondulatoria para explicar la interferencia. |
| **1811** | **Avogadro** sugiere que, a la misma temperatura y presión, todos los gases tienen igual número de moléculas por unidad de volumen. |
| **1815-1820** | **Young** y otros proporcionan evidencia para la naturaleza ondulatoria de la luz. |
| **1820** | **Oersted** descubre el efecto magnético de una corriente eléctrica. |
| **1820** | **Ampère** establece la ley de fuerza que existe entre alambres portadores de corriente. |
| **1821** | **Fraunhofer** inventa la rejilla de difracción. |
| **1824** | **Carnot** afirma que el calor no puede transformarse totalmente en trabajo. |
| **1831** | **Faraday** y **Henry** descubren la inducción electromagnética. |
| **1842-1843** | **Mayer** y **Joule** sugieren una ley general de la conservación de energía. |
| **1846** | **Adams** y **Leverrier** predicen la existencia del planeta Neptuno. |
| **1865** | **Maxwell** proporciona la teoría electromagnética de la luz. |
| **1869** | **Mendeleev** organiza los elementos en una tabla periódica. |
| **1877** | **Boltzmann** relaciona la entropía con la probabilidad. |
| **1885** | **Balmer** encuentra regularidad numérica en el espectro del hidrógeno. |
| **1887** | **Michelson** y **Morley** fallan en la detección del éter. |
| **1888** | **Hertz** genera y detecta ondas de radio. |
| **1895** | **Roentgen** descubre los rayos X. |
| **1896** | **Bequerel** descubre la radiactividad. |
| **1897** | **Thomson** identifica los rayos catódicos como corpúsculos negativos (electrones). |

**1900** **Planck** introduce la idea del cuanto.
**1905** **Einstein** introduce el concepto de corpúsculo de luz (fotón).
**1905** **Einstein** presenta la teoría de la relatividad especial.
**1911** **Rutherford** revela el átomo nuclear.
**1913** **Bohr** proporciona una teoría cuántica del átomo de hidrógeno.
**1915** **Einstein** presenta la teoría de la relatividad general.
**1923** **Compton**, con sus experimentos, confirma la existencia del fotón.
**1924** **De Broglie** presenta la teoría ondulatoria de la materia.
**1925** **Goudsmit** y **Uhlenbeck** establecen el espín del electrón.
**1925** **Pauli** enuncia el principio de exclusión.
**1926** **Schrödinger** desarrolla la teoría ondulatoria de la mecánica cuántica.
**1927** **Davisson**, **Germer** y **Thomson** verifican la naturaleza ondulatoria de los electrones.
**1927** **Heisenberg** propone el principio de incertidumbre.
**1928** **Dirac** mezcla la relatividad y la mecánica cuántica en una teoría del electrón.
**1929** **Hubble** descubre el Universo en expansión.
**1932** **Anderson** descubre la antimateria en forma de un positrón.
**1932** **Chadwick** descubre el neutrón.
**1932** **Heisenberg** proporciona la explicación de neutrón-protón de la estructura nuclear.
**1934** **Fermi** propone una teoría de la aniquilación y la creación de la materia.
**1938** **Meitner** y **Frisch** interpretan los resultados de **Hahn** y **Strassmann** como fisión nuclear.
**1939** **Bohr** y **Wheeler** proporcionan una teoría detallada de la fisión nuclear.
**1942** **Fermi** construye y opera el primer reactor nuclear.
**1945** **Oppenheimer**, y su equipo en Los Álamos, crean una explosión nuclear.
**1947** **Bardeen**, **Brattain** y **Shockley** desarrollan el transistor.
**1956** **Reines** y **Cowan** identifican el antineutrino.
**1957** **Feynman** y **Gell-Mann** explican las interacciones débiles con un neutrino "zurdo".
**1960** **Maiman** inventa el láser.
**1965** **Penzias** y **Wilson** descubren la radiación de fondo en los restos del Big Bang que aún quedan en el Universo.
**1967** **Bell** y **Hewish** descubren los pulsares, que son estrellas de neutrones.
**1968** **Wheeler** nombra los agujeros negros.
**1969** **Gell-Mann** sugiere a los quarks como los bloques constructores de los nucleones.
**1977** **Lederman** y su equipo descubren el quark fondo (bottom).
**1981** **Binning** y **Rohrer** inventan el microscopio de efecto túnel.
**1987** **Bednorz** y **Müller** descubren la superconductividad de alta temperatura.
**1995** **Cornell** y **Wieman** crean un "condensado Bose-Einstein" a 20 mil millonésimas de grado.
**1998** **Perlmutter, Schmidt** y **Riess** descubren la expansión acelerada del Universo.

**2000** **Pogge** y **Martini** ofrecen evidencia de los agujeros negros supermasivos en otras galaxias.
**2000** Un grupo del Fermilab identifica el neutrino tau, el último miembro del grupo de partículas de leptones.
**2003** Científicos que estudian la radiación en el Universo establecen la edad del Universo en 13.7 mil millones de años.
**2004** **Geim** y **Novoselov** descubren el grafeno, una forma de carbono con un grosor de un átomo.
**2005** **Gerald Gabrielse** mide el magnetismo del electrón en 1 parte en un billón.
**2006** Un equipo ruso-estadounidense identifica los elementos número 116 y 118.
**2009** El catálogo de exoplanetas (planetas que orbitan otras estrellas) crece a más de 350.
**2012** El laboratorio CERN anuncia el descubrimiento del bosón de Higgs que fue buscado por largo tiempo.

# DATOS FÍSICOS

| Categoría | Nombre | Valor |
|---|---|---|
| Rapideces | Rapidez de la luz en el vacío, $c$ | $2.9979 \times 10^8$ m/s |
| | Rapidez del sonido (20°C, 1 atm) | 343 m/s |
| Aceleración | Aceleración estándar de la gravedad, $g$ | 9.80 m/s$^2$ |
| Presión | Presión atmosférica estándar | $1.01 \times 10^5$ Pa |
| Distancias | Unidad astronómica (UA; distancia promedio entre la Tierra y el Sol) | $1.50 \times 10^{11}$ m |
| | Distancia promedio entre la Tierra y la Luna | $3.84 \times 10^8$ m |
| | Radio del Sol (promedio) | $6.96 \times 10^8$ m |
| | Radio de la Tierra (ecuatorial) | $6.37 \times 10^6$ m |
| | Radio de la órbita de la Tierra | $1.50 \times 10^{11}$ m = 1 UA |
| | Radio de la Luna (promedio) | $1.74 \times 10^6$ m |
| | Radio de la órbita de la Luna | $3.84 \times 10^8$ m |
| | Radio de Júpiter (ecuatorial) | $7.14 \times 10^7$ m |
| | Radio del átomo de hidrógeno (aprox.) | $5 \times 10^{-11}$ m |
| Masas | Masa del Sol | $1.99 \times 10^{30}$ kg |
| | Masa de la Tierra | $5.98 \times 10^{24}$ kg |
| | Masa de la Luna | $7.36 \times 10^{22}$ kg |
| | Masa de Júpiter | $1.90 \times 10^{27}$ kg |
| | Masa del protón, $m_p$ | $1.6726231 \times 10^{-27}$ kg<br>938.27231 MeV |
| | Masa del neutrón, $m_n$ | $1.6749286 \times 10^{-27}$ kg<br>939.56563 MeV |
| | Masa del electrón, $m_e$ | $9.1093897 \times 10^{-31}$ kg<br>0.51099906 MeV |
| Carga | Carga del electrón, $e$ | $1.602 \times 10^{-19}$ C |
| Otras constantes | Constante gravitacional, $G$ | $6.67259 \times 10^{-11}$ N·m$^2$/kg$^2$ |
| | Constante de Planck, $h$ | $6.6260755 \times 10^{-34}$ J·s<br>$4.1356692 \times 10^{-15}$ eV·s |
| | Número de Avogadro, $N_A$ | $6.0221367 \times 10^{23}$/mol |
| | Constante de radiación de cuerpo negro, σ | $5.67051 \times 10^{-8}$ W/m$^2$·K$^4$ |

# ABREVIATURAS ESTÁNDAR

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| A | ampere | g | gramo | min | minuto |
| uma | unidad de masa atómica | h | hora | mph | milla por hora |
| atm | atmósfera | hp | caballo de fuerza | N | newton |
| Btu | unidad térmica británica | Hz | hertz | Pa | pascal |
| C | coulomb | in. | pulgada | psi | libra por pulgada al cuadrado |
| °C | grado Celsius | J | joule | s | segundo |
| cal | caloría | K | kelvin | u | unidad de masa atómica unificada |
| eV | electrón-volt | kg | kilogramo | V | volt |
| °F | grado Fahrenheit | lb | libra | W | watt |
| ft | pie | m | metro | Ω | ohm |

# NÚMEROS EXPRESADOS EN NOTACIÓN CIENTÍFICA

| | |
|---|---|
| $1{,}000{,}000 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10$ | $= 10^6$ mega |
| $100{,}000 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10$ | $= 10^5$ |
| $10{,}000 = 10 \times 10 \times 10 \times 10$ | $= 10^4$ |
| $1{,}000 = 10 \times 10 \times 10$ | $= 10^3$ kilo |
| $100 = 10 \times 10$ | $= 10^2$ |
| $10 = 10$ | $= 10^1$ |
| $1 = 1$ | $= 10^0$ |
| $0.1 = 1/10$ | $= 10^{-1}$ |
| $0.01 = 1/100 = 1/10^2$ | $= 10^{-2}$ centi |
| $0.001 = 1/1{,}000 = 1/10^3$ | $= 10^{-3}$ mili |
| $0.0001 = 1/10{,}000 = 1/10^4$ | $= 10^{-4}$ |
| $0.00001 = 1/100{,}000 = 1/10^5$ | $= 10^{-5}$ |
| $0.000001 = 1/1{,}000{,}000 = 1/10^6$ | $= 10^{-6}$ micro |

# FACTORES DE CONVERSIÓN

**Longitud y volumen**
1 pulgada = 2.54 cm (exacto)
1 pie = 0.3048 m (exacto)
1 m = 39.37 in.
1 mi = 1.6093440 km
1 litro = $10^3$ cm$^3$ = $10^{-3}$ m$^3$

**Tiempo**
1 año = 365¼ días = $3.1558 \times 10^7$ s
1 d = 86,400 s
1 h = 3,600 s

**Masa**
1 kg = 1,000 g
1 kg tiene un peso de 2.205 lb
1 uma = $1.6605 \times 10^{-27}$ kg

**Presión**
1 Pa = 1 N/m$^2$
1 atm = $1.01325 \times 10^5$ Pa
1 lb/in.$^2$ = 6,895 Pa

**Energía y potencia**
1 cal = 4.184 J
1 kWh = $3.60 \times 10^6$ J
1 eV = $1.602 \times 10^{-19}$ J
1 u = 931.5 MeV
1 hp = 746 W

**Rapidez**
1 m/s = 3.60 km/h = 2.24 mi/h
1 km/h = 0.621 mi/h

**Fuerza**
1 lb = 4.448 N

## Acerca de la portada

En la portada se muestra un arreglo de paneles solares bajo un bello cielo azul. En cada edición de ***Física conceptual***, Paul G. Hewitt busca que sus estudiantes se deleiten con el conocimiento de esta ciencia, ya que su comprensión les ayudará a ver que ésta se encuentra en todo lo que les rodea, incluso en la tecnología que utilizan a diario.

## Haciendo de la física una delicia

El presente texto es, desde hace 30 años, el más vendido y sigue siendo un punto de referencia. En ***Física conceptual*, decimosegunda edición**, el autor presenta un texto convincente donde la física es interesante, comprensible y relevante para quienes no son científicos. Como siempre, la idea principal del libro se enfoca, en primer lugar, en los conceptos y después en los cálculos.

Esta **decimosegunda edición** deleitará a los estudiantes con *screencasts* informativos y divertidos, para los cuales deberán utilizar un dispositivo móvil para ver demostraciones en video de Paul Hewitt y Hewitt-Drew-It, al instante que les permitirá una mejor comprensión conceptual de la física. Asimismo, la actualización del contenido, las aplicaciones y las nuevas actividades de aprendizaje darán mayor sentido al estudio de la física.

***Física conceptual*** de Hewitt es famoso por atraer a los estudiantes con analogías e imágenes de la vida real, con lo que construye una comprensión conceptual más sólida de los principios físicos, la cual va desde la mecánica clásica hasta la física moderna.

www.pearsonenespañol.com

ISBN 978-607-32-3822-9